

ABSCHLUSSBERICHT

Brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen nach Eurocode 2 - 5 Vergleichsrechnungen zur Untersuchung des Sicherheitsniveaus bei unterschiedlichen Bauarten

Im Auftrag des
Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
Deichmanns Aue, 53179 Bonn
Az.: RS II - 2 - 67 41 02 - 93.41

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Dr.-Ing. Thomas Dorn
Dr.-Ing. Ekkehard Richter

Mai 1995

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einführung	1 - 1
1.1 Anlaß und Aufgabenstellung	1 - 1
1.2 Vorgehensweise	1 - 3
2 Vergleich der " heißen" Eurocodes	2 - 1
2.1 Überblick	2 - 1
2.2 Brandschutztechnische Nachweisverfahren	2 - 1
2.3 Verfügbarkeit von Rechengrundlagen	2 - 4
2.3.1 Eurocode 1 Teil 2-2	2 - 4
2.3.1.1 Thermische Einwirkungen	2 - 4
2.3.1.2 Mechanische Einwirkungen	2 - 6
2.3.1.3 Zusammenfassung	2 - 10
2.3.2 Eurocode 2 Teil 1-2	2 - 11
2.3.2.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen	2 - 11
2.3.2.2 Vereinfachte Nachweisverfahren	2 - 14
2.3.2.3 Exakte Nachweisverfahren	2 - 17
2.3.2.4 Zusammenfassung	2 - 27
2.3.3 Eurocode 3 Teil 1-2	2 - 28
2.3.3.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen	2 - 28
2.3.3.2 Vereinfachte Nachweisverfahren	2 - 28
2.3.3.3 Exakte Nachweisverfahren	2 - 38
2.3.3.4 Zusammenfassung	2 - 40
2.3.4 Eurocode 4 Teil 1-2	2 - 42
2.3.4.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen	2 - 42
2.3.4.2 Vereinfachte Nachweisverfahren	2 - 43
2.3.4.3 Exakte Nachweisverfahren	2 - 47
2.3.4.4 Zusammenfassung	2 - 48
2.3.5 Eurocode 5 Teil 1-2	2 - 50
2.3.5.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen	2 - 50
2.3.5.2 Vereinfachte Nachweisverfahren	2 - 50
2.3.5.3 Exakte Nachweisverfahren	2 - 51
2.3.5.4 Zusammenfassung	2 - 52
2.4 Vorgaben zum Sicherheitskonzept	2 - 53
2.4.1 Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi}$	2 - 53
2.4.2 Lastniveau für die brandschutztechnische Bemessung $\eta_{fi,t}$	2 - 55
3 Vergleich des erzielten Sicherheitsniveaus	3 - 1
3.1 Überblick	3 - 1
3.1.1 Zuverlässigkeitsnachweis	3 - 1
3.2 Anwendungsbeispiele	3 - 4
3.2.1 Überblick	3 - 4

3.2.1	Überblick	3 -	4
3.2.2	Eurocode 2 - Betonbauwerke	3 -	4
3.2.3	Eurocode 3 und 4 - Stahl- und Verbundbauwerke	3 -	5
3.2.4	Eurocode 5 - Holzbauwerke	3 -	6
3.3	Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 2 Teil 1-2	3 -	6
3.3.1	Vereinfachtes Nachweisverfahren im Normteil	3 -	6
3.3.1.1	Grenzzustandsgleichung	3 -	7
3.3.1.2	Streuung der Einflußgrößen	3 -	8
3.3.1.3	Numerische Untersuchung eines Einfeldbalkens	3 -	10
3.3.1.4	Numerische Untersuchung einer Stütze	3 -	15
3.3.2	Vereinfachtes Nachweisverfahren im Anhang	3 -	19
3.3.2.1	Grenzzustandsgleichung	3 -	19
3.3.2.2	Streuung der Einflußgrößen	3 -	19
3.3.2.3	Numerische Untersuchung eines Einfeldbalkens	3 -	20
3.4	Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 3 Teil 1-2	3 -	21
3.4.1	Krit. T - Verfahren	3 -	21
3.4.1.1	Grenzzustandsgleichung	3 -	21
3.4.1.2	Streuung der Einflußgrößen	3 -	24
3.4.1.3	Numerische Untersuchung eines Einfeldträgers	3 -	25
3.4.1.4	Numerische Untersuchung einer Stütze	3 -	28
3.5	Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 4 Teil 1-2	3 -	32
3.5.1	Vereinfachtes Nachweisverfahren im Anhang E	3 -	32
3.5.1.1	Grenzzustandsgleichung	3 -	32
3.5.1.2	Streuung der Einflußgrößen	3 -	34
3.5.1.3	Numerische Untersuchung eines Deckenträgers	3 -	34
3.6	Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 5 Teil 1-2	3 -	38
3.6.1	Δd -Verfahren (Effective cross-section method)	3 -	38
3.6.1.1	Grenzzustandsgleichung	3 -	38
3.6.1.2	Streuung der Einflußgrößen	3 -	40
3.6.1.3	Numerische Untersuchung einer Pfette	3 -	40
3.6.1.4	Numerische Untersuchung einer Stütze	3 -	43
3.6.2	T_m -Verfahren (Reduced strength and stiffness method)	3 -	46
3.6.2.1	Grenzzustandsgleichung	3 -	46
3.6.2.2	Streuung der Einflußgrößen	3 -	47
3.6.2.3	Numerische Untersuchung einer Pfette	3 -	47
3.6.2.4	Numerische Untersuchung einer Stütze	3 -	49
3.7	Überprüfung der Sicherheitskonzepte	3 -	51
3.7.1	Sicherheitsindex	3 -	51
3.7.2	Maßgebende Unsicherheiten	3 -	52
3.7.3	Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung	3 -	55
3.7.3.1	Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 2 Teil 1-2, normativ	3 -	57
3.7.3.2	Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 2 Teil 1-2, Anhang	3 -	59
3.7.3.3	Krit. T - Verfahren im EC 3 Teil 1-2	3 -	59

III

3.7.3.4	Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 4 Teil 1-2	3 -	62
3.7.3.5	Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 5 Teil 1-2, Δd -Verfahren	3 -	63
3.7.3.6	Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 5 Teil 1-2, T_m -Verfahren	3 -	64
3.8	Zusammenfassung	3 -	66
4	Zusammenfassende Wertung und Empfehlungen	4 -	1
5	Literatur	5 -	1
5.1	Literatur zum Kapitel 1	5 -	1
5.2	Literatur zum Kapitel 2	5 -	2
5.3	Literatur zum Kapitel 3	5 -	4

1 Einführung

1.1 Anlaß und Aufgabenstellung

Mit der Einführung der Eurocodes werden rechnerische Nachweisverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen für die Praxis bereitgestellt mit dem Ziel einer künftigen bauaufsichtlichen Einführung. Die Brandschutzteile sind dabei den jeweiligen Eurocode-Teilen für die Bemessung im Kaltzustand angegliedert. Dabei wird nach den unterschiedlichen Baustoffen Beton, Stahl, Verbund, Holz und Mauerwerk unterschieden.

Die in den einzelnen Codes angegebenen Rechenverfahren, insbesondere die sog. vereinfachten Verfahren der Nachweisstufe 2 wurden von Experten der einzelnen Bauweisen entwickelt. Durch die übergreifende Vorgabe von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Materialseite zur Berücksichtigung der von Baustoff zu Baustoff unterschiedlichen Festigkeitsstreuungen und Festlegung des im Brandfall zu berücksichtigenden Lastniveaus wurde versucht, ein einheitliches Sicherheitsniveau zu erreichen. Das Sicherheitsniveau wurde jedoch bislang an keiner Stelle offengelegt.

Unterschiede im Sicherheitsniveau sind zu erwarten, weil die Rechenverfahren in verschiedenen europäischen Ländern entwickelt wurden und ihre Verifizierung an Brandversuchsergebnissen der jeweiligen nationalen Prüfanstalten erfolgte. In früheren Jahren durchgeführte Untersuchungen [1/1] zeigten aber, daß die Prüfung identischer Versuchskörper in den verschiedenen Prüfständen aufgrund der spezifischen Wärmeübergangsbedingung und Lagerung der geprüften Bauteile zu nennenswert unterschiedlichen Feuerwiderstandsdauern führt.

Da die Brandschutzteile der Eurocodes unmittelbar vor der Veröffentlichung als Vornorm (ENV) stehen, ist die Dringlichkeit von Vergleichsrechnungen im Hinblick auf die Vereinheitlichung des Sicherheitsniveaus bei Verwendung unterschiedlicher Baustoffe sehr groß. Die Untersuchungsergebnisse schaffen die Basis für die künftige deutsche Haltung zu den Vornormen (ENV) vor deren Überführung in Europäische Normen (EN).

In der vorliegenden Studie soll ein Vergleich des Sicherheitsniveaus bei der brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen aus unterschiedlichen Baustoffen

nach den Regelungen in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 5 durchgeführt werden. Dazu sollen für die verschiedenen Bauwerkskategorien

- Wohngebäude,
- Geschößbau,
- Industriehalle,
- Hochhaus,
- Parkhaus,

praxisgerechte Beispiele ausgewählt und für die Ausführung mit unterschiedlichen Baustoffen (Beton, Stahl, Verbund und Holz) bemessen werden.

Es wird angestrebt, die ggf. vorhandenen Unterschiede im Sicherheitsniveau bei Bemessung von Bauteilen aus verschiedenen Baustoffen für die gleiche Tragfunktion in einem Gebäude offenzulegen. Der Vergleich soll die in den Eurocodes vorgegebenen Nachweisstufen 1 bis 3 (vereinfacht bis exakt) berücksichtigen. Damit wird die Basis geschaffen, das Sicherheitsniveau bei Verwendung der einzelnen Baustoffe in der Praxis zu vereinheitlichen.

Die Studie baut auf Ergebnissen des vom BMBau unter Aktenzeichen BI6B-810788-9 in den Jahren '89 und '90 geförderten Forschungsvorhabens [1/2], in dem bestehende praxisgerechte brandschutztechnische Auslegungsverfahren für Bauteile aus Stahlbeton, Stahl und Holz untersucht und mit einem einheitlichen Sicherheitskonzept bewertet wurden. Für Verbundbauteile werden die Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen [1/3, 1/4] als Grundlage genutzt.

Die rechnerischen Untersuchungen werden auf der Basis der prENVs der Eurocode 2 bis 5, jeweils Teil 1-2, in den Entwurfsfassungen von 1993 - 1994 durchgeführt. Dabei können bestehende, am iBMB der TU Braunschweig entwickelte exakte Rechenverfahren [1/5, 1/6] genutzt werden, die zum Teil auch bei der Entwicklung der jetzt in die Eurocodes aufgenommenen vereinfachten Rechenverfahren zur Kalibrierung verwendet wurden.

1.2 Vorgehensweise

Als Grundlage für vergleichende Untersuchungen der erreichten Sicherheitsniveaus steht zum einen das in [1/2] entwickelte (stark vereinfachte) Sicherheitskonzept zur Verfügung. Dabei werden die in den Eurocodes angegebenen Bemessungsverfahren

- anhand von Tabellen mit Mindestquerschnittsabmessungen (Nachweisstufe 1)
- rechnerischen Näherungsverfahren (Nachweisstufe 2) und
- exakten Rechenverfahren (Nachweisstufe 3)

mit Ergebnissen aus Brandversuchen unter Einbindung internationaler Untersuchungsergebnisse [1/7, 1/8] verglichen, um eventuelle Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei Verwendung der verschiedenen Baustoffe offenzulegen.

Zum anderen erfolgt eine detailliertere probabilistische Sicherheitsbewertung exemplarisch für Bemessungen nach den Eurocodes 2, 3, 4 und 5. Aufgrund dieser Untersuchung können die in den Eurocodes angegebenen Bemessungsverfahren anhand eines für alle Konstruktionsbaustoffe gültigen, vereinheitlichten Sicherheitskonzept in Anlehnung an Ansätze in [1/9] bewertet und erforderlichenfalls modifiziert werden.

Aus den verschiedenen Bauwerkskategorien (s. Kapitel 1.1) werden jeweils ein oder zwei repräsentative Bauteile ausgewählt; für eine Industriehalle z. B.

- ein Dachbinder,
- eine Geschoßdecke,
- eine Innenstütze,
- eine Außenstütze,
- ein Aussteifungsverband,
- ein aussteifender Rahmen.

Dabei werden die Gebäudeabmessungen so gewählt, daß die Ausführung der Bauteile sowohl in Stahl-, Stahlbeton-, Verbund- als auch in Holzbauweise erfolgen könnte. Dadurch wird ein direkter Vergleich des erreichten Sicherheitsniveaus bei der brandschutztechnischen Bemessung nach den baustoffspezifischen Eurocodes ermöglicht.

Die einzelnen Bauteile werden nun entsprechend dem jeweiligen Eurocode für die Beanspruchung unter Raumtemperatur bemessen. Daran anschließend erfolgt die brandschutztechnische Bemessung mit den drei aufgeführten Methoden nach Nachweisstufe 1 bis 3. Dabei stellt die Bemessung mit dem exakten Rechenprogramm [1/5, 1/6] den Bezugswert zur Ermittlung des erreichten Sicherheitsniveaus dar, da mit diesem "Simulationsprogramm" der Vergleich zu den durchgeführten Bauteilbrandversuchen hergestellt und die mittlere Abweichung von rechnerischer Simulation zum Versuch beziffert werden kann.

Im nächsten Schritt werden die benutzten brandschutztechnischen Bemessungsverfahren in Anlehnung an [1/9] probabilistisch analysiert und bewertet.

Zum Schluß werden die Anwendungsgrenzen der vereinfachten Bemessungsverfahren (Nachweisstufe 1 + 2) durch Vergleich der Ergebnisse mit denen exakter Berechnungsmodelle (Nachweisstufe 3) bestimmt. Dazu werden die für das Brandverhalten der Bauteile maßgebenden Parameter schrittweise auf Extremwerte gesteigert und dabei die Abweichungen zwischen Näherungslösung und "exaktem" Ergebnis überprüft. Die zulässige Abweichung ergibt sich aus dem zuvor festgelegten Sicherheitsniveau.

Im einzelnen waren folgende Arbeiten durchzuführen:

- 1) Vervollständigung der vorhandenen Datenbank mit Ergebnissen in- und ausländischer Bauteilbrandversuche
- 2) Überprüfung der Genauigkeit der exakten Rechenverfahren durch Vergleich von Rechenergebnissen mit Bauteilbrandversuchen
- 3) Auswahl und Festlegung von Bauteilen für die rechnerischen Vergleichsuntersuchungen mit Methoden der Nachweisstufe 1 und 2
- 4) Durchführung der Bemessung für den Kaltzustand und den Brandfall nach den vorliegenden prENVs der Eurocodes
- 5) Auswertung und Gegenüberstellung der erzielten Sicherheitsniveaus
- 6) ggf. Vorschlag von Modifikationen (z. B. geänderten indikativen Werten) der bestehenden Bemessungsansätze
- 7) Festlegung der Anwendungsgrenzen.

Ein wesentliche Ziel dieser Untersuchung liegt darin, eventuell vorhandene Sicherheitslücken bei der brandschutztechnischen Auslegung von Bauteilen aufzudecken. Dar-

auf basierend sollen Vorschläge zur Modifikation der Bemessungsverfahren im Zuge der Erarbeitung nationaler Anwendungsdokumente (NAD's) abgeleitet werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Untersuchung besteht darin, daß

- Erfahrungen in der Anwendung der verschiedenen "heißen" Eurocodes gesammelt werden,
- Bemessungsbeispiele bereitgestellt werden, die dem Anwender die Arbeit mit den Eurocodes 2 - 5, Teile 1.2 erleichtern und
- auf diese Weise die Akzeptanz der Eurocodes in der Fachöffentlichkeit erhöht wird.

2 Vergleich der " heißen" Eurocodes

2.1 Überblick

Während der Durchführung dieses Forschungsvorhabens haben sich die Eurocode-Entwürfe wiederholt geändert. Im wesentlichen wurden folgende englische Fassungen zugrundegelegt:

- Auslegungsgrundlagen und Lastannahmen Eurocode 1 Teil 2-2 (ENV 1991-2-2), 1994 [2/19],
- Betonkonstruktionen Eurocode 2 Teil 1-2 (prENV 1992-1-2), Oct. 1993 [2/20],
- Stahlkonstruktionen Eurocode 3 Teil 1-2 (prENV 1993-1-2), Oct. 1993 [2/23],
- Verbundkonstruktionen Eurocode 4 Teil 1-2 (ENV 1994-1-2), Oct. 1994 [2/7],
- Holzkonstruktionen Eurocode 5 Teil 1-2 (ENV 1995-1-2), Oct. 1993 [2/24].

Die Eurocodes enthalten sog. "indikative", d. h. nur als Anhalt zu verstehende Zahlen, die im Text der Eurocodes durch eine Einrahmung oder durch eckige Klammern gekennzeichnet sind. Diese Zahlenwerte können, zumindest innerhalb einer Übergangsfrist, national durch die einzelnen EU-Länder festgelegt werden [2/1].

2.2 Brandschutztechnische Nachweisverfahren

Die "heißen" Eurocodes enthalten grundsätzlich brandschutztechnische Nachweisverfahren auf drei Stufen:

- anhand von Tabellen mit Mindestquerschnittsabmessungen und Mindestbekleidungs-
dicken (Nachweisstufe 1),
- mittels rechnerischer Näherungsverfahren (Nachweisstufe 2) und
- mittels exakter Rechenverfahren (Nachweisstufe 3).

Die Nachweisverfahren anhand von Tabellen beschränken den Nachweis in der Regel darauf, daß für das zu untersuchende Bauteil die Querschnittsabmessungen und - z. B. bei Betonbauteilen - der Achsabstand der Bewehrung mit Werten verglichen werden, die zum Erreichen der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind.

Mit den rechnerischen Näherungsverfahren wird in der Regel nachgewiesen, daß alle maßgebenden Lasteinwirkungen auch nach Ablauf der vorgeschriebenen Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils ohne Versagen aufgenommen werden können. Dafür werden u. a. Vereinfachungen im Rahmen der Temperaturermittlung für die Bauteilquerschnitte und zur Beschreibung des Versagenszustandes im Brandfall getroffen.

Im Verbundbau wird beispielsweise von der Annahme ausgegangen, daß für geometrisch einfach begrenzte Querschnittsbereiche eines Bauteils repräsentative Temperaturverläufe bestimmt werden können. Die mittlere Entfestigung und die Abnahme des Elastizitätsmoduls dieser Bereiche kann dann in Abhängigkeit von der Branddauer angegeben werden, ohne daß eine spezielle Temperaturberechnung durchgeführt werden muß. Wesentlicher Einflußparameter ist dabei der Profilkfaktor A_m/V des Querschnitts, d. h. der Quotient aus beflammer Oberfläche zum Volumen als Maß für seine Massigkeit; er entspricht dem U/A-Wert der DIN 4102 Teil 4.

Die Festigkeitsabminderung der Baustoffe wird erfaßt, indem die Maxima der temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien über der Temperatur aufgetragen werden. Mit den für die einzelnen Bereiche berechneten Spannungen ergeben sich die plastischen Grenztragfähigkeiten aus den Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte.

Erst die "exakten" Rechenverfahren ermitteln für eine vorgegebene Feuerwiderstandsdauer das tatsächliche Tragvermögen, u. U. auch das Verformungsverhalten der Bauteile. Sie bieten Lösungen für drei Probleme des baulichen Brandschutzes:

- 1) Ermittlung des Gleichgewichts- und Verformungszustands eines Einzelbauteils zu beliebigen Zeitpunkten t_i bei vorgegebenem Temperatur-Zeitverlauf in der Bauteilumgebung, Belastung und Lagerungsbedingungen. Damit kann ein Brandversuch simuliert werden.
- 2) Ermittlung der von einem Einzelbauteil maximal aufnehmbaren Belastung (N_u , M_u) zu einem vorgegebenen Temperatur-Zeitverlauf in der Bauteilumgebung nach vorgegebener Brandeinwirkungsdauer.
- 3) Untersuchung von Gesamt- oder Teiltragwerken aus mehreren zusammenhängenden Bauteilen bei lokal begrenzter Brandbeanspruchung, wobei sowohl Temperaturbeaufschlagungen nach ISO 834 (ETK) als auch natürliche Brände simuliert werden können.

Die "exakte" rechnerische Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens brandbeanspruchter Stahlbeton-, Spannbeton-, Stahl- und Verbundbauteile kann mit verschiedenen Methoden vorgenommen werden:

- Die Querschnittsanalyse, d. h. die Ermittlung der Steifigkeit des Querschnitts bei bekannter Temperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt, erfolgt zunächst separat. Unter Berücksichtigung der Querschnittssteifigkeiten kann dann die Berechnung der Zustandsgrößen am vorliegenden statischen System, d. h. die Bauteil- bzw. Tragwerksanalyse, durchgeführt werden.
- Die Querschnitts- und die Bauteil- bzw. Tragwerksanalyse erfolgt in einem Rechengang unter Verwendung des Verfahrens der Finiten Elemente in Weggrößenformulierung.

Bei der ersten Methode wird für vorgegebene Zeitschritte unter Ansatz der zuvor berechneten instationären Temperaturfelder die nichtlineare Beziehung zwischen Biegemoment und Krümmung bei vorgegebener Längskraft bestimmt. Der Zusammenhang zwischen Krümmung und Moment wird in der Regel mit folgenden Vereinfachungen ermittelt:

- Es gilt die Bernoulli-Naviersche Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte.
- Die temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien sind nichtlinear-elastisch definiert.
- Die Querschnittselemente werden ohne bleibende Dehnung entlastet.
- Bei Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen wird schlupffreier Verbund zwischen Beton und Stahl vorausgesetzt.

Zur Ermittlung der Querschnittssteifigkeit wird das Elementraster, das der Berechnung der Temperaturen im Querschnitt zugrunde lag, übernommen. Für die Elementtemperaturen werden die thermischen Dehnungen bestimmt. Bei Vorgabe der Krümmungsebene werden die Randdehnungen iterativ so festgelegt, daß die Summe der Einzelkräfte der Elemente mit der vorhandenen Längskraft im Gleichgewicht steht. Dazu werden durch Separation der thermischen von den spannungserzeugenden Dehnungen die Spannungen der einzelnen Elemente aus den zugehörigen Spannungs/Dehnungslinien bestimmt und integriert. Zu diesem Dehnungszustand läßt sich das Biegemoment als Spannungsergebnis ermitteln.

Mit den dann bekannten Momenten/Krümmungslinien (nichtlinearen Steifigkeiten) können die Zustandsgrößen des Bauteils nach dem Reduktionsverfahren in Verbindung mit Übertragsbedingungen berechnet werden. Dabei ist das Bauteil in Längsrichtung in Elemente diskretisiert. Der Traglastzustand kann durch Stabilitätsversagen infolge Steifigkeitsverlust (Abflachen der M/κ -Beziehung, Abnahme der Steifigkeit $dM/d\kappa$) erreicht werden. Das Verfahren eignet sich in erster Linie für stabförmige Bauteile in Beton-, Stahl- und Stahlverbundbauweise [2/8].

2.3 Verfügbarkeit von Rechengrundlagen

2.3.1 Eurocode 1 Teil 2-2

Im Eurocode 1 Teil 2-2 [2/19] werden Rechengrundlagen zur Ermittlung der Temperatur- und Lasteinwirkungen gegeben. Der Brandfall wird als ein "außergewöhnliches Ereignis" (accidental situation) angesehen, das nicht mit anderen unabhängigen "außergewöhnlichen Ereignissen" überlagert zu werden braucht. Auch zeit- und lastabhängige Einflüsse auf das Tragverhalten, die vor Auftreten des Brandfalls wirksam werden, müssen nicht berücksichtigt werden. Dadurch ist es z. B. zulässig, das Trag- und Verformungsverhalten von Betonstützen im Brandfall ohne Berücksichtigung von Kriech- und Schwindeinflüssen zu ermitteln, die bis zum Zeitpunkt der Brandbeanspruchung bereits aufgetreten sind.

Bei der brandschutztechnischen Bemessung ist es nicht erforderlich, die Abkühlphase zu berücksichtigen.

2.3.1.1 Thermische Einwirkungen

Die thermischen Einwirkungen werden im Eurocode 1 Teil 2-2 als Wärmestromdichte (net heat flux) h'_{net} vorgegeben, die aus einem radiativen und einem konvektiven Anteil besteht.

Die radiative Wärmestromdichte $h'_{\text{net,r}}$ [W/m^2] wird nach Gl. (2.1) ermittelt:

$$h'_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_{\text{res}} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2.1)$$

mit	Φ	Faktor zur Berücksichtigung von Abschattungen [-]
	ϵ_{res}	resultierender Emissionsgrad [-]
	θ_r	Strahlungstemperatur der Umgebung [°C]
	θ_m	Oberflächentemperatur des Bauteils [°C]
	$5,67 \cdot 10^{-8}$	Stefan Boltzmann Konstante [W/m ² K ⁴].

Die konvektive Wärmestromdichte $h'_{\text{net,c}}$ [W/m²] wird nach Gl. (2.2) berechnet:

$$h'_{\text{net,c}} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (2.2)$$

mit	α_c	Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion [W/m ² K]
	θ_g	Heißgastemperatur in der Umgebung des Bauteils [°C]
	θ_m	Oberflächentemperatur des Bauteils [°C].

Vereinfachend dürfen der Faktor $\Phi = [1,0]$, die Strahlungstemperatur θ_r gleich der Heißgastemperatur θ_g und $\alpha_c = [9]$ [W/m²K] auf der feuerabgekehrten Bauteilseite gesetzt werden.

Für die brandschutztechnische Bemessung werden verschiedene standardisierte Temperaturzeitkurven zur Beschreibung der Heißgastemperatur θ_g in Abhängigkeit der Branddauer t [min] mit dem jeweils zugehörigen Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion α_c vorgegeben, z. B. die Standard-Temperaturzeitkurve nach Gl. (2.3)

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (2.3)$$

$$\text{mit } \alpha_c = [25] \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

und die Hydrocarbon-Kurve nach Gl.(2.4)

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \quad (2.4)$$

$$\text{mit } \alpha_c = [50] \text{ [W/m}^2\text{K]}.$$

Im Zusammenhang mit der Anwendung von standardisierten Temperaturzeitkurven sind die Anteile aus konvektiver und radiativer Wärmestromdichte nach Gl. (2.5) zu addieren und es ist ein resultierender Emissionsgrad ϵ_{res} [-] entsprechend Gl. (2.6) zu berücksichtigen:

$$h'_{\text{net,d}} = \gamma_{\text{n,c}} \cdot h'_{\text{net,c}} + \gamma_{\text{n,r}} \cdot h'_{\text{net,r}} \quad (2.5)$$

mit $\gamma_{\text{n,c}}$ Faktor zur Berücksichtigung unterschiedlicher nationaler Brandversuche, i.d.R. [1,0]
 $\gamma_{\text{n,r}}$ [1,0], wie für $\gamma_{\text{n,c}}$

$$\varepsilon_{\text{res}} = \varepsilon_{\text{t}} \cdot \varepsilon_{\text{m}} \quad (2.6)$$

mit ε_{t} Emissionsgrad des Brandraums, i.a. [0,8]
 ε_{m} Emissionsgrad der Bauteiloberfläche; wenn in den baustoffbezogenen Eurocodes EC 2 bis 5 kein spezieller Wert angegeben ist, wird für $\varepsilon_{\text{m}} = [0,7]$ vorgeschlagen.

Neben der Möglichkeit, die thermische Beanspruchung der Bauteile mit Hilfe von standardisierten Temperaturzeitkurven zu berechnen, bietet der Eurocode 1 Teil 2-2 im informativen Anhang sog. parametrische Brandbeanspruchungen an, die in Übereinstimmung mit nationalen Anwendungsbereichen benutzt werden können.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wird die Heißgastemperaturentwicklung im Brandraum entsprechend der Standard-Temperaturzeitkurve (Gl. (2.3)), die identisch der Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2 [2/2] ist, vorausgesetzt.

2.3.1.2 Mechanische Einwirkungen

Im Eurocode 1 Teil 2-2 wird zwischen direkten und indirekten Einwirkungen unterschieden.

Als direkte Einwirkungen werden die bei der "kalten" Bemessung berücksichtigten Belastungen (Eigengewicht, Wind, Schnee, usw.) bezeichnet. Im normativen Anhang F vom Eurocode 1 Teil 2-2 werden allgemeine Regeln zur Berücksichtigung von Schneelasten, Verringerung der Belastung durch Abbrand, Berücksichtigung von Lasten infolge Betrieb (z. B. horizontale Kräfte infolge Kranbewegung) gegeben. Mit der Kombinationsregel für außergewöhnliche Ereignisse Gl. (2.7), in der die Teilsicherheitsbeiwerte

für ständige und veränderliche Einwirkungen $\gamma_G = \gamma_Q = 1,0$ gesetzt sind, wird die maßgebliche Beanspruchung $E_{fi,d,t}$ während der Brandeinwirkung festgelegt:

$$E_{fi,d,t} = \Sigma \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \Sigma A_d(t) \quad (2.7)$$

mit	G_k	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen
	$Q_{k,1}$	charakteristischer Wert einer (des Leitwertes der) veränderlichen Einwirkung
	$Q_{k,i}$	charakteristischer Wert weiterer veränderlicher Einwirkungen
	$A_d(t)$	Bemessungswert der indirekten Einwirkungen
	γ_{GA}	= [1,0] Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen bei außergewöhnlichen Ereignissen
	$\psi_{1,1}, \psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwert nach Eurocode 1 Teil 1 (ENV 1991-1)
		Die Kombinationsbeiwerte $\psi_{1,1}$ und $\psi_{2,i}$ können nur im Zusammenhang mit der Definition charakteristischer Einwirkungen festgelegt werden, was zur Zeit nicht möglich ist, da einheitliche europäische Lastnormen (künftiger Eurocode 1 Teil 1) noch nicht in ihrer endgültigen Form vorliegen [2/29]. Die im Rahmen der probeweisen Anwendung von Eurocode 2 nach [2/30] maßgebenden Kombinationsbeiwerte für Verkehrslasten auf Decken zeigt auszugsweise die folgende Zusammenstellung:

Einwirkung	$\psi_{1,1}$	$\psi_{2,i}$
Wohnräume; Büroräume; Verkaufsräume bis 50 m ² ; Flure; Balkone; Räume in Krankenhäusern;	0,5	0,3
Versammlungsräume; Garagen und Parkhäuser; Turnhallen; Tribünen; Flure in Lehrgebäuden; Büchereien; Archive;	0,8	0,5
Ausstellungs- und Verkaufsräume; Geschäfts- und Warenhäuser.	0,8	0,8

Indirekte Einwirkungen infolge Brandbeanspruchung sind Kräfte und Momente, die durch thermische Ausdehnungen, Verformungen und Verkrümmungen hervorgerufen werden. Sie brauchen nicht berücksichtigt zu werden, sofern sie das Tragverhalten nur geringfügig beeinflussen und/oder durch entsprechende Ausbildung der Auflager aufgenommen werden. Außerdem brauchen sie bei der brandschutztechnischen Bemessung von Einzelbauteilen nicht gesondert verfolgt zu werden.

Bei der Beurteilung der indirekten Einwirkungen sind besonders zu beachten:

- Zwangkräfte in Bauteilen, z. B. in Stützen mehrgeschossiger rahmenartiger Bauwerke mit aussteifenden Wänden,
- unterschiedliche thermische Ausdehnung in statisch unbestimmt gelagerten Bauteilen, z. B. durchlaufenden Decken,
- Eigenspannungen infolge thermischer Krümmungen,
- Auswirkungen thermischer Ausdehnung auf angrenzende Bauteile, z. B. Verschiebung des Stützenkopfes infolge thermischer Ausdehnung der Decke sowie
- Auswirkungen thermischer Ausdehnung auf Bauteile, die nicht vom Feuer beansprucht werden.

Für die Ermittlung der indirekten Einwirkungen sind die thermischen und mechanischen Materialwerte aus den Eurocodes 2 bis 5 zu benutzen.

Für den Fall, daß die indirekten Einwirkungen vernachlässigt werden, wird Gl. (2.7) für den Zeitpunkt $t = 0$ ausgewertet ($A_d(t=0) = 0$).

Als weitere Vereinfachung von Gl. (2.7) können die Einwirkungen während der Brandbeanspruchung direkt aus den Einwirkungen bei Normaltemperatur nach Gl. (2.8) ermittelt werden:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (2.8)$$

mit E_d Bemessungswert der Einwirkungen nach Eurocode 1
Teil 1, mit Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte
für ständige und veränderliche Einwirkungen γ_G , γ_Q

$$\eta_{fi} = (\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi) / (\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi) \quad (2.9)$$

Reduktionsfaktor, abhängig vom Verhältnis des Hauptwertes der veränderlichen Einwirkungen zur ständigen Einwirkung $\xi = Q_{k,1}/G_k$.

Werte für den Reduktionsfaktor η_{fi} sind den Eurocodes 2 bis 5 zu entnehmen. Bild 2.1 zeigt die Auswertung von Gl. (2.9) mit Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$ für drei Kombinationsbeiwerte $\psi_{1,1}$ nach Eurocode 1 Teil 1 (ENV 1991-1).

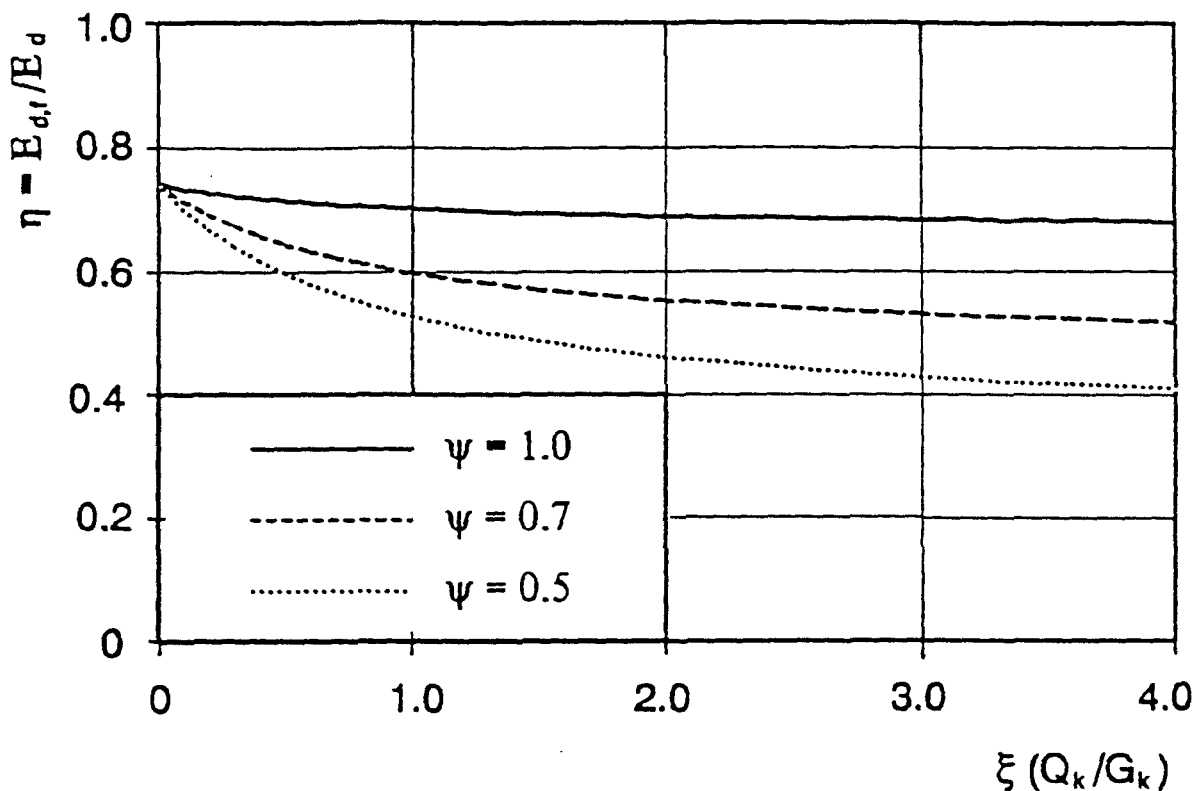


Bild 2.1 Verhältnis zwischen den Bemessungswerten der Beanspruchung im Brandfall und unter normalen Nutzungsbedingungen in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen ständiger und dominierender veränderlicher Einwirkung bei vorgegebenen Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$ [2/28].

Der brandschutztechnischen Bemessung mit Tabellen liegt das Lastniveau nach Gl. (2.10) zugrunde:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} \cdot R_d \quad (2.10)$$

mit	R_d	Bemessungswert des Bauteilwiderstands nach Teil 1 der Eurocodes 2 bis 5
	$\eta_{fi,t}$	Lastniveau für die brandschutztechnische Bemessung

2.3.1.3 Zusammenfassung

Der Teil 2-2 des Eurocodes 1 regelt die für die praktischen Nachweise erforderlichen konzeptionellen Vorgaben, Auslegungsgrundsätze, Sicherheitsbeiwerte und Lastannahmen.

Die Systemrandbedingungen und Belastungen für Nachweise des Brandverhaltens werden generell im Einklang mit der Kaltbemessung gewählt. Die Interaktion zwischen verschiedenen Bauteilen, einschließlich der Wirkung von thermischen Dehnungen, muß jedoch (zumindest konstruktiv) berücksichtigt werden, sofern nicht ungünstige Veränderungen der Randbedingungen und Schnittgrößen durch Brand ausgeschlossen werden können. Hierzu werden in den einzelnen Eurocodes zusätzliche Richtlinien und Beispiele gegeben. In Übereinstimmung mit der bisherigen Brandschutzpraxis wird die Temperaturerhöhung im Brandraum in den Eurocodes primär durch standardisierte Temperaturzeitkurven beschrieben; für die Ermittlung der Bauteiltemperaturen werden Wärmeübergangskoeffizienten angegeben. Alternativ darf die Temperaturerhöhung mit Wärmebilanzrechnungen ermittelt werden. Hierzu werden in informativen Anhängen Hinweise gegeben.

Nach dem probabilistischen Sicherheitskonzept dürfen beim Nachweis der Tragfähigkeit von Bauteilen im Katastrophenfall Brand die Materialkennwerte im allgemeinen mit ihrem 1,0fachen Nennwert angesetzt werden. Für die mechanischen Einwirkungen werden Kombinationsregeln angegeben, die bei den Verkehrslasten gegenüber den Gebrauchslasten der Kaltbemessung Abminderungen durch Kombinationsbeiwerte ψ vorsehen. Vereinfacht dürfen die Bemessungsschnittgrößen im Brandfall mit ca. 70 % der Schnittgrößen aus der Kaltbemessung angenommen werden. Durch systematische Vergleiche zwischen Rechenergebnissen und Brandversuchen ist noch zu prüfen, inwieweit rechnerische Nachweise nach diesem vereinfachten Sicherheitskonzept an Erfahrungen aus der Brandprüfpraxis anknüpfen.

2.3.2 Eurocode 2 Teil 1-2

2.3.2.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen

Der Eurocode 2 Teil 1-2 [2/20] enthält Tabellen für die brandschutztechnische Bemessung von

- Stützen,
- nichttragenden und tragenden Wänden,
- Zuggliedern,
- Einfeld- und Durchlaufbalken,
- statisch bestimmt gelagerten und durchlaufenden Decken,
- Flachdecken,
- Rippendecken ohne und mit mindestens einem eingespannten Rand.

Die Tabellen für Decken und Rippendecken gelten für ein- und zweiachsig gespannte Bauteile; die für Zugglieder, Balken und Decken für schlaff bewehrte und vorgespannte Bauteile. Der Anwendungsbereich der Tabellen erstreckt sich von der Feuerwiderstandsklasse R (EI) 30 bis R (EI) 240. *)

Die Tabellen enthalten in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsklasse Mindestwerte für die Querschnittsabmessungen und für die Achsabstände der Bewehrung, wobei für Stützen und belastete Wände als zusätzlicher Parameter der Lastausnutzungsfaktor angegeben ist.

In den Tabellen darf zwischen den angegebenen Werten linear interpoliert werden. Weitere Rechenvorschriften ermöglichen für statisch bestimmt gelagerte Balken und Decken die individuelle Ermittlung der kritischen Temperatur sowie für Stützen und belastete Wände die Bestimmung des aktuellen Lastausnutzungsfaktors.

*) Klassifizierung R für Tragfähigkeit, E für Raumabschluß, I für thermische Isolierung, letztere sind nur bei raumabschließenden Wänden und Decken maßgebend.

Für statisch bestimmt gelagerte Balken und Decken ist der Achsabstand der Bewehrung so festgelegt, daß zur betrachteten Feuerwiderstandsdauer die kritische Temperatur in der Betonstahlbewehrung 500 °C beträgt. Bei dieser Temperatur und der Stahlspannung $\sigma_{s,fi}$ erreicht der Stahl seine Fließspannung, wobei die Einwirkungen $E_{d,fi} = 0.7 \cdot E_d$ und der Teilsicherheitsbeiwert für Stahl $\gamma_s = 1,15$ betragen. Für Spannstahl beträgt die kritische Temperatur für Stäbe 400 °C bzw. für Litzen und Drähte 350 °C.

Für die Fälle, in denen die Einwirkungen $E_{d,fi} < 0.7 \cdot E_d$ sind, wird die zugehörige Spannung $\sigma_{s,fi}$ im Betonstahl nach Gl. (2.11) berechnet

$$\sigma_{s,fi} = E_{d,fi}/E_d \cdot f_{yk}(20^\circ\text{C})/\gamma_s \cdot A_{s,req}/A_{s,prov} \quad (2.11)$$

mit	$E_{d,fi}/E_d$	Verhältnis des Bemessungswerts der Einwirkungen im Brandfall zu dem bei Normaltemperatur
	$f_{yk}(20^\circ\text{C})$	Charakteristischer Wert für die Festigkeit an der Streckgrenze des Betonstahls
	γ_s	Teilsicherheitsbeiwert für Stahl (i.a.: 1,15)
	$A_{s,req}$	erforderliche Fläche des Betonstahlquerschnitts im Grenzzustand der Tragfähigkeit
	$A_{s,prov}$	vorhandene Fläche des Betonstahlquerschnitts.

Mit dem temperaturabhängigen Reduktionsfaktor für die Festigkeit des Betonstahls $k_s(\theta)$ nach Gl. (2.12) und Bild 2.2 wird die kritische Temperatur θ_{cr} bestimmt.

$$k_s(\theta) = \sigma_{s,fi}/f_{yk}(20^\circ\text{C}) \quad (2.12)$$

Für die Bedeutung der Bezeichnungen siehe Erklärungen zu Gl. (2.11)

Mit Hilfe der ermittelten kritischen Temperatur θ_{cr} werden die in den Tabellen gegebenen Achsabstände um das Maß Δa nach Gl. (2.13) reduziert:

$$\Delta a = 0,1 \cdot (500 - \theta_{cr}) \quad (2.13)$$

Die Gleichungen (2.11) bis (2.13) sowie Bild 2.2 können mit den entsprechenden Parametern auch für Spannstahl angewendet werden.

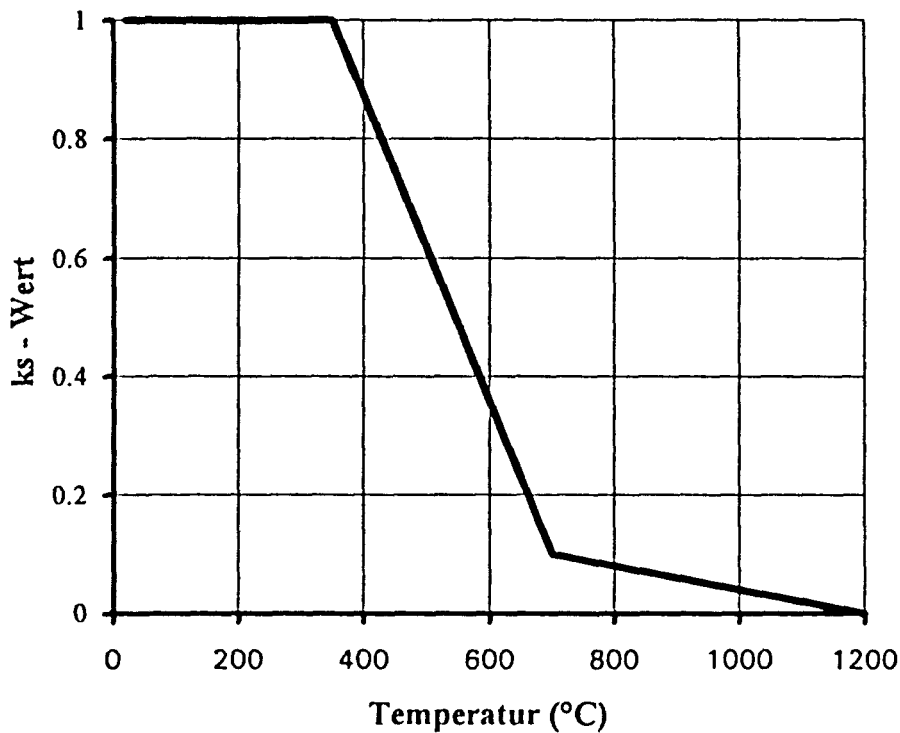


Bild 2.2 Abnahme der charakteristischen Festigkeit f_{yk} von Betonstahl mit ansteigender Temperatur ($k_s(\theta)$ -Werte)

Zur Bestimmung des aktuellen Lastausnutzungsfaktors im Brandfall wird im Eurocode 2 Teil 1-2 für Stützen und belastete Wände der Verhältnisswert μ_{fi} nach Gl. (2.14) eingeführt:

$$\mu_{fi} = E_{d,fi} / R_{d,fi}(0) \quad (2.14)$$

mit $E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d$ nach Gl. (2.8)
 $R_{d,fi}(0)$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit nach ENV 1992-1-1 Abschnitt 4.3.5 (Knicksicherheitsnachweis) mit $\gamma_M = 1$ und $t = 0$.

Bei der Berechnung von μ_{fi} ist für die Ersatzlänge des Druckgliedes l_0 die Stützenlänge zwischen den ideellen Einspannstellen l_{col} anzunehmen.

Um für die Berechnung von $R_{d,fi}(0)$ die Bemessungshilfen aus dem DAfStb Heft 425 [2/25] anwenden zu können, müssen die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M aus den Werten der Nomogramme "herausgerechnet" werden. Die Nomogramme gelten für alle Beton-

festigkeitsklassen, d. h. unabhängig vom Teilsicherheitsbeiwert γ_c , aber die Querschnittstragfähigkeit wurde mit $\max \sigma_s = f_{yd} = 500/1,15 = 435 \text{ N/mm}^2$ ermittelt, so daß sich bei Zugrundelegung anderer Teilsicherheitsbeiwerte als $\gamma_s = 1,15$ entsprechende Abweichungen ergeben. Nach [2/26] kann die Bemessung mit $f_{yd} = 500 \text{ N/mm}^2$, d. h. $\gamma_s = 1,00$, in der Weise durchgeführt werden, daß mit einer $(1,15)^{0.5}$ -fach vergrößerten bezogenen Stützenlänge l_0/h gearbeitet wird.

Ohne Berechnung kann $\mu_{fi} = [0,7]$ gesetzt werden.

2.3.2.2 Vereinfachte Nachweisverfahren

Vereinfachtes Nachweisverfahren im Eurocode 2 Teil 1-2

Das vereinfachte Nachweisverfahren im Eurocode 2 Teil 1-2 kann zur Ermittlung der Biege- und Schubtragfähigkeit von schlaff bewehrten oder vorgespannten Balken, Platten und Wänden sowie der Tragfähigkeit von Stützen benutzt werden. Das Verfahren arbeitet mit temperaturabhängig verkleinerten Bauteilquerschnitten und temperaturabhängig reduzierten Baustoffeigenschaften [2/27]. Durch die Verkleinerung der Bauteilquerschnitte werden die äußeren, dem Brand direkt ausgesetzten und im wesentlichen zermürbten Betonbereiche von der Tragfähigkeitsermittlung ausgeschlossen, während die reduzierten Baustoffeigenschaften die temperaturabhängige Trag- und Verformungsfähigkeit des Restquerschnitts berücksichtigen.

Im einzelnen müssen folgende Bemessungsschritte durchgeführt werden:

- a) Ermittlung der Temperaturverteilung im Betonquerschnitt:
Zur Ermittlung der Temperaturverteilung im Betonquerschnitt sind im Anhang 2 vom Eurocode 2 Teil 1-2 Isothermenbilder und Temperaturprofile enthalten.
- b) temperaturabhängige Verkleinerung des Betonquerschnitts b' , h'

$$b' = b - 2 \cdot a_z \quad (2.14a)$$

$$h' = h - 2 \cdot a_z \quad (2.14b)$$

durch Berechnung der zerstörten äußeren Betonbereiche a_z
für Balken und Platten

$$a_z = w \cdot [1 - k_{c,m}/k_c(\theta_M)] \quad (2.15)$$

für Stützen

$$a_z = w \cdot [1 - (k_{c,m}/k_c(\theta_M))^{1,3}] \quad (2.16)$$

mit w halbe Breite des Balkens, der Wand oder der Stütze

$$k_{c,m} = (1 - 0,2/n)/n \cdot \sum k_c(\theta_i) \quad (2.17)$$

mittlere Festigkeitsabnahme des Betons in der betrachteten halben Bauteilbreite, die in $n \geq 3$ Streifen unterteilt wird ($1 \leq i \leq n$)

$$k_c(\theta_i) = f_{cd}(\theta_i)/f_{ck}(20^\circ\text{C}) \quad (2.18)$$

Festigkeitsabnahme des Betons infolge der Temperatur θ_i im Streifen i der betrachteten halben Bauteilbreite entsprechend Bild 2.3

$k_c(\theta_M)$ Festigkeitsabnahme des Betons infolge der Temperatur θ_M im Punkt M der Druckzone entsprechend Bild 2.3.

Im Eurocode 2 Teil 1-2, Anhang 2 sind Rechenhilfen abgedruckt, die eine schnelle Ermittlung des verkleinerten Betonquerschnitts für Balken, Decken und Wände erlauben.

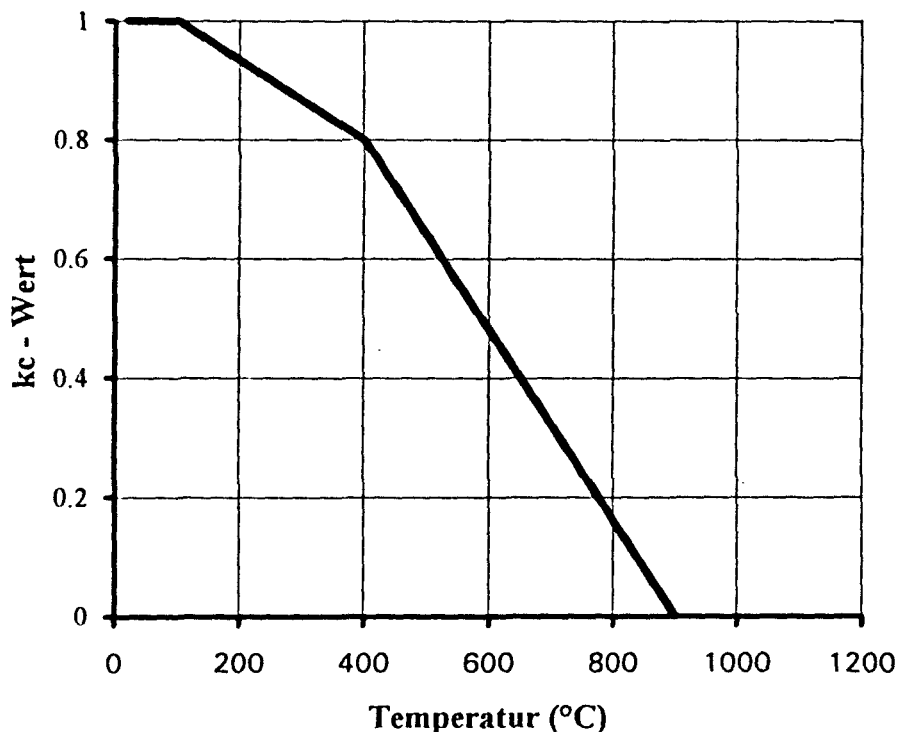


Bild 2.3 Abnahme der Druckfestigkeit f_{ck} von Beton mit ansteigender Temperatur ($k_c(\theta)$ -Werte)

- c) temperaturabhängige Reduzierung der Festigkeit der Bewehrung nach Gl. (2.19) und Bild 2.2

$$k_s(\theta) = f_{yk}(\theta)/f_{yk}(20^\circ\text{C}) \quad (2.19)$$

sowie des E-Moduls von Beton nach Gl. (2.20)

$$E_{cd}(\theta_M) = (k_c(\theta_M))^2 \cdot E_{ck}(20^\circ\text{C}) \quad (2.20)$$

- d) Berechnung der Grenzzustände der Tragfähigkeit des Bauteils mit dem verkleinerten Betonquerschnitt b' , h' und den reduzierten Baustoffeigenschaften nach den Regeln für die Kaltbemessung gemäß Eurocode 2 Teil 1-1 (ENV 1992-1-1) und
- e) Vergleich der berechneten Grenzzustände der Tragfähigkeit (Bauteilwiderstand) mit der unter Beachtung der Kombinationsregeln vorgegebenen Einwirkungskombination.

Vereinfachtes Nachweisverfahren im Anhang des Eurocodes 2 Teil 1-2

Ein weiteres vereinfachtes Nachweisverfahren für die Berechnung der "heißen" Tragfähigkeit von Einfeldträgern und durchlaufenden Balken sowie von Decken ist im informativen Anhang 3 des Eurocodes 2 Teil 1-2 enthalten. Das Näherungsverfahren ist besonders für Bauteile geeignet, bei denen der vorhandene Achsabstand der Bewehrung kleiner ist als der Wert, der in den Tabellen des Eurocodes 2 Teil 1-2 als Mindestwert gefordert wird. Voraussetzung für die Anwendung des vereinfachten Nachweisverfahrens ist, daß die Querschnittsabmessungen ansonsten mindestens den Werten der Tabellen des Eurocodes 2 Teil 1-2 entsprechen.

Für den Brandfall werden die Bemessungsmomente der Einwirkungen $M_{Sd,fi}$ und des Bauteilwiderstandes $M_{Rd,fi}$ berechnet, wobei Gleichung (2.21) einzuhalten ist:

$$M_{Sd,fi} \leq M_{Rd,fi} \quad (2.21)$$

Für Einfeldbalken kann das Bemessungsmoment der Einwirkungen vereinfachend nach Gl. (2.8) und das des Bauteilwiderstandes nach Gl. (2.22) berechnet werden.

$$M_{Rd,fi} = \gamma_s/\gamma_{s,fi} \cdot k_s(\theta) \cdot M_{Sd} \cdot A_{s,prov}/A_{s,req} \quad (2.22)$$

mit	γ_s	Teilsicherheitsfaktor der Bewehrung nach ENV 1992-1-1 (i. a.: 1,15)
	$\gamma_{s,fi}$	Teilsicherheitsfaktor der Bewehrung bei Brandbeanspruchung (i. a.: 1,00)
	$k_s(\theta)$	Reduktionsfaktor für die Festigkeit der Bewehrung nach Gl. (2.11) bzw. Bild 2.2; die Temperatur der Bewehrung θ kann für die untersuchte Feuerwiderstandszeit aus den Isothermenbildern oder Temperaturprofilen im Anhang 2 des Eurocodes 2 Teil 1-2 entnommen werden
	M_{Sd}	Bemessungsmoment der Einwirkungen für Normaltemperatur nach ENV 1992-1-1
	$A_{s,prov}$	vorhandene Fläche der Bewehrung
	$A_{s,req}$	erforderliche Fläche der Bewehrung im Grenzzustand der Tragfähigkeit; dabei muß eingehalten werden: $A_{s,prov}/A_{s,req} \leq 1,3$.

Für Durchlaufkonstruktionen wird bei Brandbeanspruchung eine Momentenumlagerung vom Feld zu den Auflagerbereichen vorgenommen. Dafür wird eine ausreichend weit ins Feld geführte Stützbewehrung vorausgesetzt. Das Moment für den Bauteilwiderstand an der Stelle des größten Feldmomentes $M_{Rd,Feld,fi}$ wird nach Gl. (2.22) ermittelt; die Momente des Bauteilwiderstandes über den Auflagern $M_{Rd,fi}$ sind dann unter Einhaltung der Gleichgewichtsbedingung zu bestimmen.

2.3.2.3 Exakte Nachweisverfahren

Im Eurocode 2 Teil 1-2 werden generelle Hinweise zum Anwendungsbereich, zum Umfang und zu den Grenzen von exakten Nachweisverfahren gegeben.

Der Anwendungsbereich umfaßt Einzelbauteile, Tragwerksausschnitte und Gesamtsysteme mit beliebig gestalteten Bauteilquerschnitten. Eine Unterteilung des exakten Nachweisverfahrens in eine thermische und eine mechanische Analyse (Rechenmodell) kann vorgenommen werden.

Die thermische Analyse soll beinhalten

- Bestimmung der thermischen Einwirkungen entsprechend Eurocode 1 Teil 2-2 (s. Abschnitt 2.3.1.1 dieses Berichtes),
- Berücksichtigung temperaturabhängiger thermischer Materialkennwerte und
- den Einfluß von Schutzschichten auf die Erwärmung.

Nicht berücksichtigt bzw. zur sicheren Seite abgeschätzt werden kann bei der thermischen Analyse

- der Feuchtigkeitsgehalt und die Feuchtigkeitsbewegung im Beton und in Schutzschichten,
- der Einfluß der Bewehrung auf die Temperatúrausbreitung im Betonquerschnitt und
- eine nicht gleichförmige thermische Beanspruchung sowie der Wärmetransport in angrenzende Bauteile.

Bei der mechanischen Analyse sollen im wesentlichen berücksichtigt werden:

- temperaturabhängige mechanische Baustoffkennwerte,
- nichtlineare geometrische Einflüsse,
- Einwirkungen infolge thermisch verursachter Dehnungen und Spannungen sowie
- alle Dehnungen infolge Temperatur, mechanischer Einwirkungen, Kriechen und instationärer Hochtemperatureinflüsse.

Für die Beurteilung der Tragfähigkeit von Einzelbauteilen, Tragwerksausschnitten und Gesamtsystemen unter Brandbeanspruchung können Rechenmodelle nach der Plastizitätstheorie verwendet werden. Dabei sind bei der Berechnung der plastischen Rotationsfähigkeit die im Brandfall vergrößerten Bruchdehnungen von Beton und Bewehrung zu berücksichtigen.

Die Gültigkeit der exakten Nachweisverfahren bzw. -modelle soll durch Vergleich mit Ergebnissen von Brandprüfungen sichergestellt werden.

Im informativen Anhang 1 des Eurocodes 2 Teil 1-2 werden zusätzliche Informationen zur temperaturabhängigen Veränderung der mechanischen und thermischen Stoffwerte von Beton und Bewehrung gegeben.

Mechanische Stoffwerte von Beton und Bewehrung

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton und Bewehrung (Beton- und Spannstahl) wird durch temperaturabhängige Spannungs/Dehnungslinien beschrieben. Diese Spannungs/Dehnungslinien basieren auf der Auswertung von Meßergebnissen aus instationären Kriechversuchen, wobei die Dehnungen naturgemäß sowohl die temperaturabhängigen elastischen und plastischen Anteile als auch die sehr viel größeren instationären Hochtemperatur-Kriechanteile enthalten.

Für Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen zeigt Bild 2.4 temperaturabhängige Spannungs/Dehnungslinien.

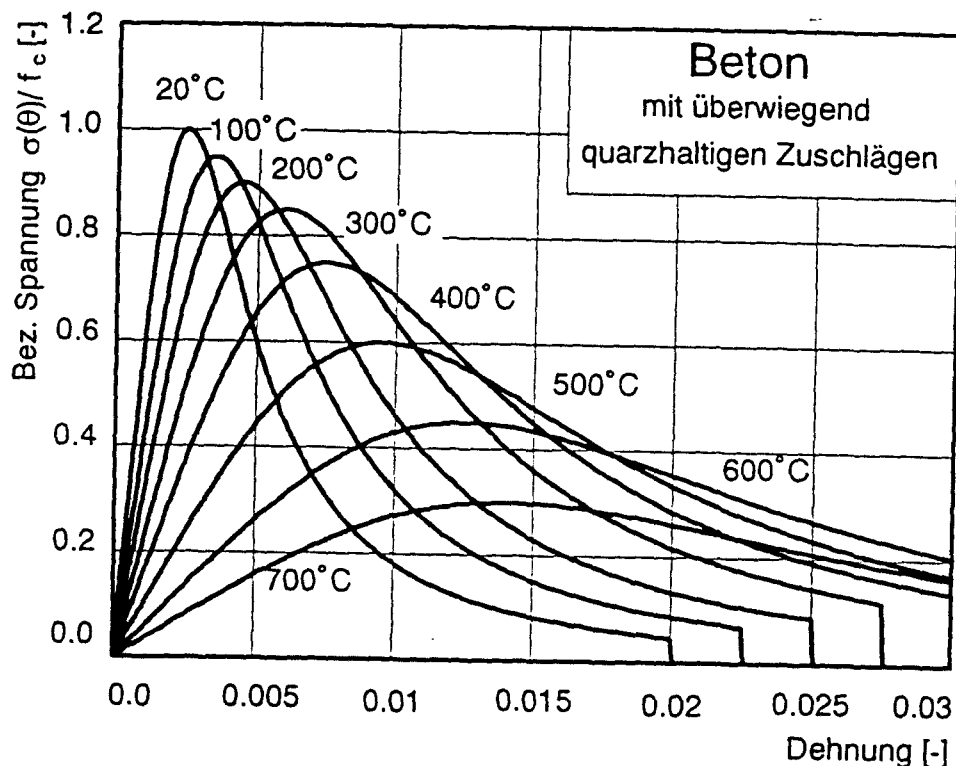
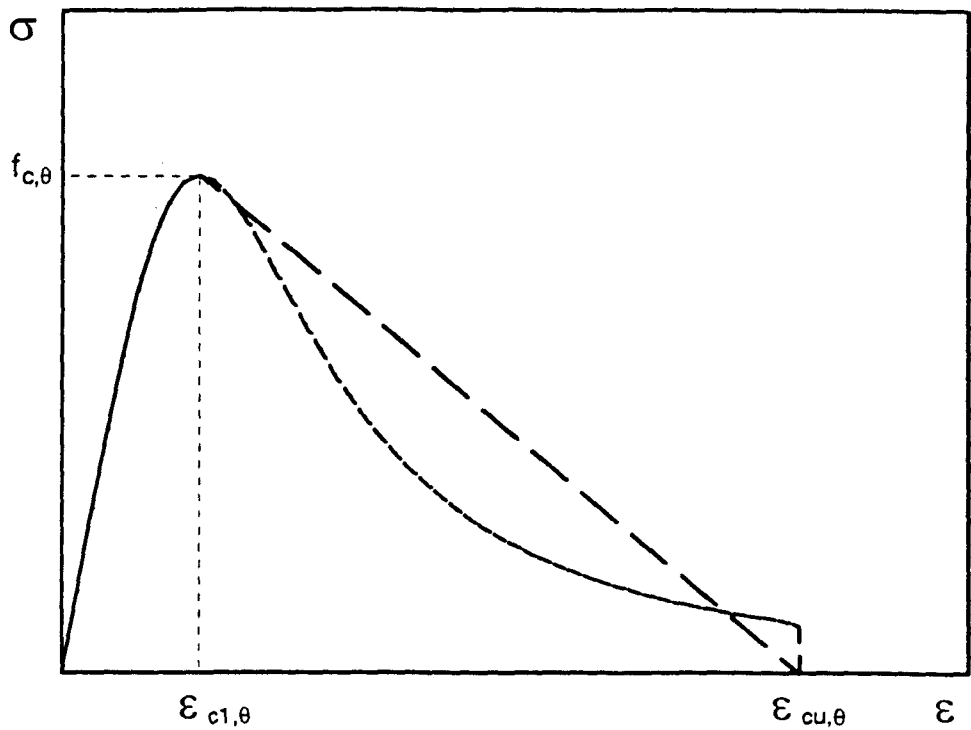


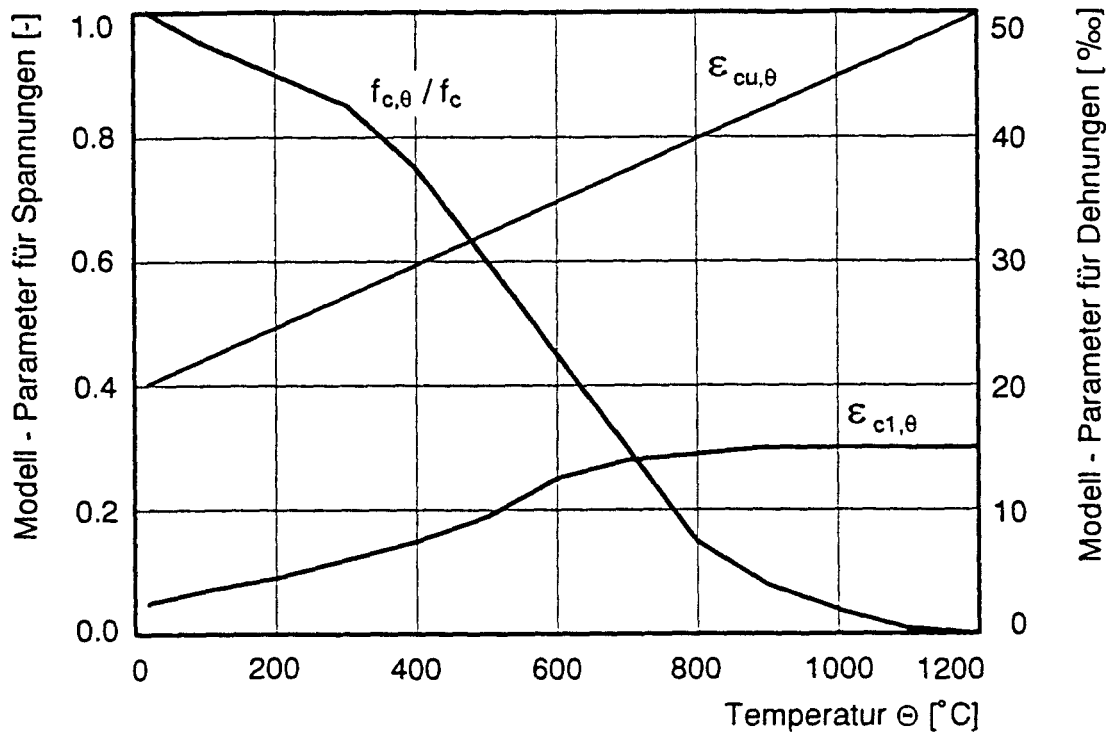
Bild 2.4 Temperaturabhängige Spannungs/Dehnungslinien von Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen

Zur funktionalen Beschreibung der temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien von Beton werden im Eurocode 2 Teil 1-2, Anhang 1 das im Bild 2.5 dargestellte Modell und die entsprechenden Gleichungen benutzt. Die Temperaturabhängigkeiten der Modell-Parameter Festigkeitsmaximum $f_{c,\theta}$ und der zugehörigen Dehnung $\epsilon_{c1,\theta}$ sind im Bild 2.6 dargestellt.



Dehnungsbereich	Spannung $\sigma(\theta)$
$\epsilon \leq \epsilon_{c1,\theta}$	$f_{c,\theta} \left[\frac{3 \epsilon}{\epsilon_{c1,\theta} \left(2 + \frac{\epsilon}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)} \right]$
$\epsilon_{c1(\theta)} < \epsilon \leq \epsilon_{cu,\theta}$	<p>a) Spannung $\sigma(\theta)$ berechnen mit Gleichung des Dehnungsbereich $\epsilon \leq \epsilon_{c1(\theta)}$.</p> <p>b) Spannung $\sigma(\theta)$ berechnen mit linearer Funktion bis $\epsilon_{cu(\theta)}$.</p>

Bild 2.5 Modell und Gleichungen zur Beschreibung der Spannungs/Dehnungslinien von Beton bei erhöhten Temperaturen



Betontemperatur Θ [°C]	$f_{c,\theta} / f_c$	$\epsilon_{c1,\theta}$ [‰]	$\epsilon_{cu,\theta}$ [‰]
	quarzhaltig		
20	1.00	2.5	20.0
100	0.95	3.5	22.5
200	0.90	4.5	25.0
300	0.85	6.0	27.5
400	0.75	7.5	30.0
500	0.60	9.5	32.5
600	0.45	12.5	35.0
700	0.30	14.0	37.5
800	0.15	14.5	40.0
900	0.08	15.0	42.5
1000	0.04	15.0	45.0
1100	0.01	15.0	47.5
1200	0.00	15.0	50.0

Bild 2.6 Temperaturabhängige Modell-Parameter für Spannungs/Dehnungslinien von Beton mit überwiegend quarzhaltigem Zuschlag

Neben der Beschreibung von temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien von Beton mit überwiegend quarzhaltigem Zuschlag enthält der Anhang 1 vom Eurocode 2 Teil 1-2 entsprechende Angaben für Beton mit kalkhaltigem Zuschlag.

Die im Anhang 1 des Eurocodes 2 Teil 1-2 wiedergegebenen temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien von Beton stellen einen Kompromiß zwischen verschiedenen europäischen Forschungsergebnissen dar. Für die zum Spannungsmaximum gehörenden Dehnwerte $\epsilon_{c1,\theta}$ hat man sich auf die Angabe von "empfohlenen" Werten - diese liegen den Bildern 2.4 und 2.6 zugrunde - und die Angabe eines Streubereiches entschieden. Für die Beschreibung des abfallenden Astes der Spannungs/Dehnungslinie wird entweder eine lineare Funktion oder die Fortsetzung der Funktion die für den aufsteigenden Ast gemäß Bild 2.6 vorgeschlagen.

Bild 2.7 zeigt temperaturabhängige Spannungs/Dehnungslinien für einen Betonstahl BSt 500 S, kaltverformt.

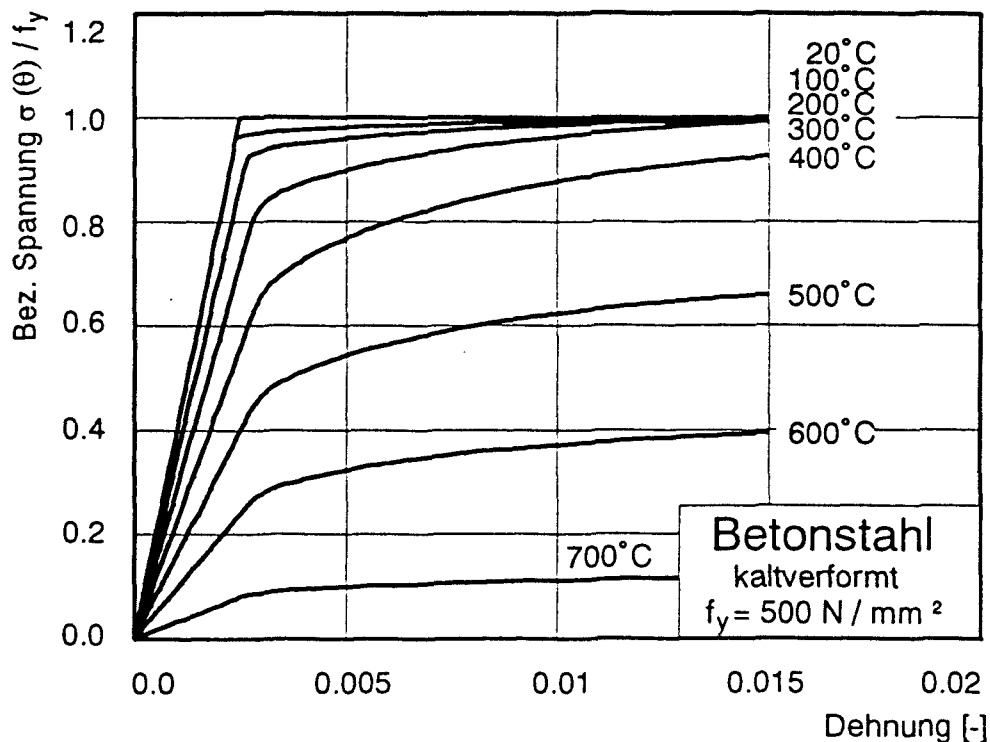
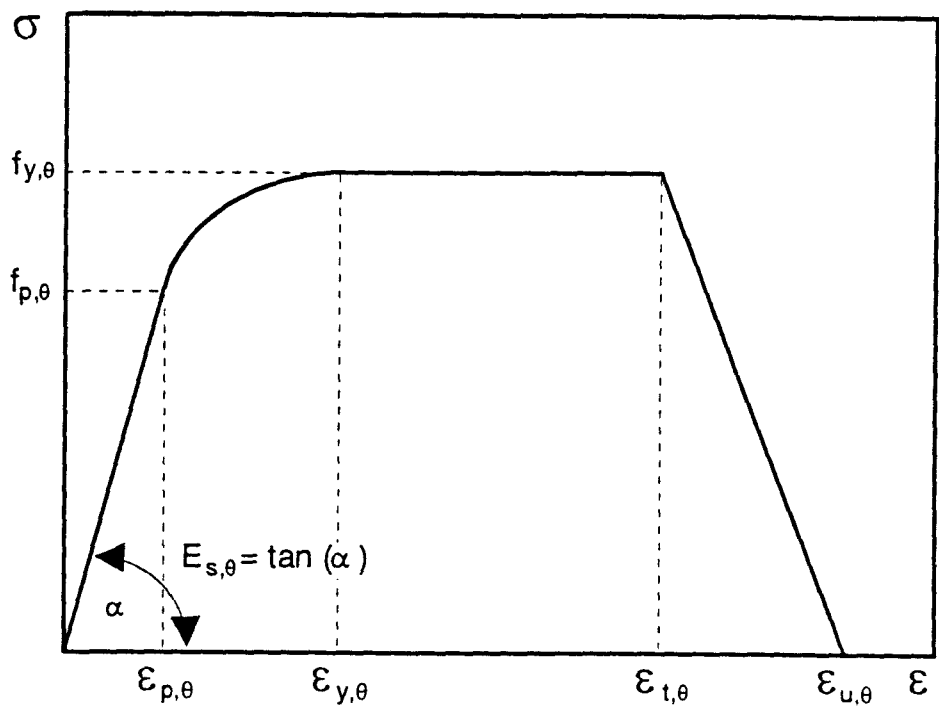


Bild 2.7 Temperaturabhängige Spannungs/Dehnungslinien von Betonstahl BSt 500 S, kaltverformt

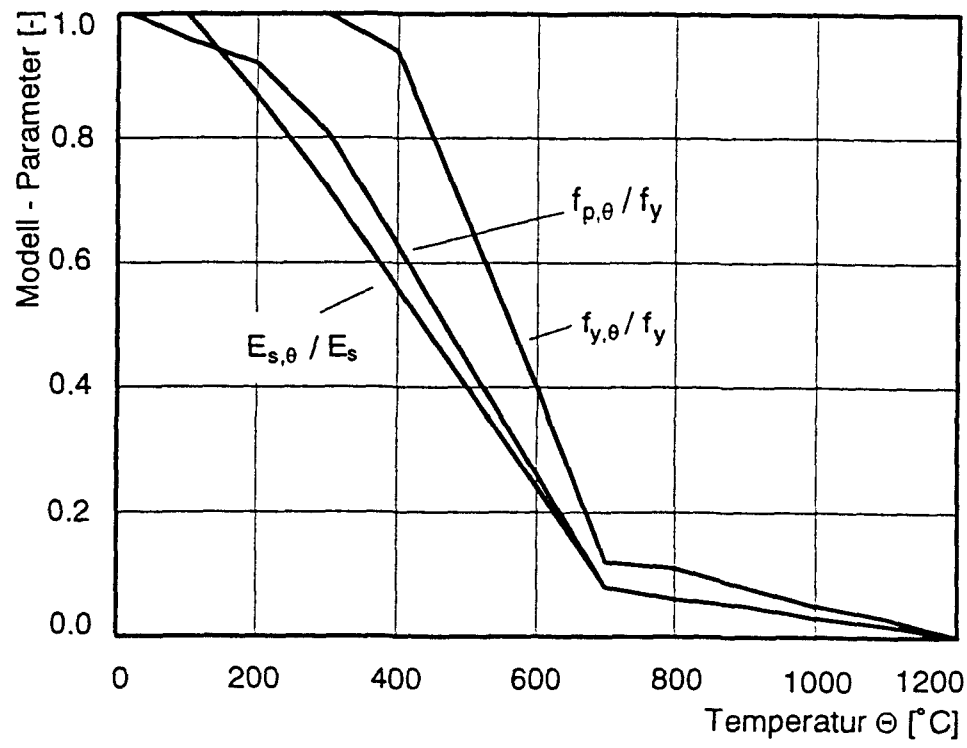
Das Modell und die Gleichungen zur Beschreibung der temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien von Betonstahl BSt 500 S, kaltverformt sind im Bild 2.8 angegeben. Die Temperaturabhängigkeit der Modell-Parameter Steigung des linear-elastischen Bereichs ($E_{s,\theta}$), Proportionalitätsgrenze ($f_{p,\theta}$) und Fließspannung ($f_{y,\theta}$) sind im Bild 2.9 dargestellt.

Neben den Spannungs/Dehnungslinien für Betonstahl BSt 500 S, kaltverformt sind im Eurocode 2 Teil 1-2, Anhang 1 Angaben für Betonstahl BSt 500 S, warmgewalzt sowie vergüteten und kaltgezogenen Spannstahl enthalten.



Dehnungsbereich	Spannung $\sigma(\theta)$	Tangentenmodul
$\varepsilon < \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c - (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{p,\theta})^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} \leq \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parameter	$\varepsilon_{p,f} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$	
Funktionen	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

Bild 2.8 Modell und Gleichungen zur Beschreibung der Spannungs/Dehnungslinien von Betonstahl BSt 500 S, kaltverformt bei erhöhten Temperaturen



	Bezogene temperaturabhängige Parameter		
Stahltemperatur Θ [°C]	effektive Fließspannung $f_{y,Θ} / f_y$	Proportionalitätsgrenze $f_{p,Θ} / f_y$	Steigung des linear elast. Bereichs $E_{s,Θ} / E_s$
20	1.00	1.00	1.00
100	1.00	0.96	1.00
200	1.00	0.92	0.87
300	1.00	0.81	0.72
400	0.94	0.63	0.56
500	0.67	0.44	0.40
600	0.40	0.26	0.24
700	0.12	0.08	0.08
800	0.11	0.06	0.06
900	0.08	0.05	0.05
1000	0.05	0.03	0.03
1100	0.03	0.02	0.02
1200	0.00	0.00	0.00

Bild 2.9 Temperaturabhängige Modell-Parameter für Spannungs/Dehnungslinien von Betonstahl BSt 500 S, kaltverformt

Thermische Stoffwerte von Beton und Bewehrung

Für Beton mit überwiegend quarzhaltigen oder kalkhaltigen Zuschlägen sowie für Leichtbeton sind im Anhang 1 von Eurocode 2 Teil 1-2 funktionale und graphische Darstellungen für den temperaturabhängigen Verlauf der thermischen Dehnung $\epsilon_{th,c}$, der spezifischen Wärmekapazität c_c und der Wärmeleitfähigkeit λ_c enthalten. Für die Dichte ρ_c wird für Beton mit überwiegend quarzhaltigen oder kalkhaltigen Zuschlägen ein temperaturunabhängiger Wert von 2300 kg/m^3 empfohlen.

Für die Bewehrung in Form von Betonstahl oder Spannstahl enthält der Anhang 1 vom Eurocode 2 Teil 1-2 funktionale und graphische Darstellungen für den temperaturabhängigen Verlauf der thermischen Dehnung ϵ_{th} . Für die Dichte ρ_s wird ein temperaturunabhängiger Wert von 7850 kg/m^3 angegeben.

Neben den temperaturabhängigen Beschreibungen der thermischen Stoffwerte von Beton und Bewehrung enthält der Anhang 1 vom Eurocode 2 Teil 1-2 Angaben über thermische Stoffwerte, die für eine vereinfachte Berechnung der Temperaturverteilung benutzt werden können:

für Beton mit überwiegend quarzhaltigem Zuschlag

- $\epsilon_{th,c} = 18 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_c$
mit θ_c : Temperatur im Beton [$^{\circ}\text{C}$]
- $c_c = 1000 \text{ [J/kgK]}$
- $\lambda_c = 1,60 \text{ [W/mK]},$

für Beton mit überwiegend kalkhaltigem Zuschlag

- $\epsilon_{th,c} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_c$
- $c_c = 1000 \text{ [J/kgK]}$
- $\lambda_c = 1,30 \text{ [W/mK]}$

und für Leichtbeton

- $\epsilon_{th,c} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_c$
- $c_c = 840 \text{ [J/kgK]}$
- $\lambda_c = 0,80 \text{ [W/mK]}.$

Eine weitere Vereinfachung wird durch die Vorgabe einer konstanten Temperaturleit-
zahl a_c [m^2/s] gegeben

$a_c = 0,69 \cdot 10^{-6}$ für Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen
und

$a_c = 0,56 \cdot 10^{-6}$ für Beton mit überwiegend kalkhaltigen Zuschlägen.

2.3.2.4 Zusammenfassung

Als einfachste Nachweisform existieren Tabellen für die Bemessung von Stützen, Wänden, Zuggliedern sowie biegebeanspruchten Balken und Decken, die grundsätzlich nicht von den entsprechenden Tabellen in DIN 4102 Teil 4 [2/16] abweichen.

Im Eurocode 2 Teil 1-2 werden vereinfachte Nachweisverfahren zur Ermittlung der Biege- und Schubtragfähigkeit von schlaff bewehrten und vorgespannten Balken, Decken und Wänden sowie zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Stützen angeboten. Die dafür benötigten Temperaturwerte werden als Graphiken mit Isothermenverläufe im Anhang 2 vom Eurocode 2 Teil 1-2 für einige ausgesuchte Querschnittsformen bereitgestellt.

Im Anhang des Eurocodes 2 Teil 1-2 ist ein weiteres vereinfachtes Nachweisverfahren enthalten, das besonders für Einfeldbalken und Durchlaufträger sowie für Decken geeignet ist, bei denen der vorhandene Achsabstand der Bewehrung kleiner als der entsprechende Mindestwert in den Tabellen von Eurocode 2 Teil 1-2 ist.

Im Eurocode 2 Teil 1-2 beschränken sich die Angaben zu den "exakten" Rechenverfahren (Simulationsverfahren) auf generelle Hinweise zum Anwendungsbereich, zum Umfang und zu den Grenzen der Rechenverfahren. Die für die Rechenverfahren erforderlichen thermischen und mechanischen Baustoffkennwerte sind im Anhang zum Eurocode 2 Teil 1-2 zusammengestellt. Für die mechanischen Baustoffkennwerte werden einheitliche Annahmen als Kompromißlösungen aus unterschiedlichen nationalen Vorschlägen empfohlen, gleichzeitig wird der Streubereich aufgezeigt.

In Tabelle 2.1 sind die zur Zeit im Eurocode 2 Teil 1-2 geregelten Nachweisarten zusammengestellt.

Tabelle 2.1 Übersicht über die in Eurocode 2 Teil 1-2 behandelten Brandschutznachweise

Bauteile	Nachweismethode		
	Tabellen/ Tafeln	Vereinfachte Nachweise	"exakte" Nachweise
Decken (Platten)	x	x	x
Balken	x	x	x
Wände (Scheiben)	x	-	x
Stützen	x	x	x
Zugglieder	x	x	x
Teilsysteme, Gesamtsysteme	-	-	für stabförmige Tragwerke

2.3.3 Eurocode 3 Teil 1-2

Grundlage für die Beurteilung der Tragfähigkeit brandbeanspruchter Stahlbauteile sind die Hochtemperatureigenschaften des Werkstoffes. Die thermischen Kennwerte des Stahls wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und thermische Dehnung werden im Eurocode 3 Teil 1-2 [2/23] ebenso wie Spannungs/Dehnungslinien zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens in temperaturabhängiger Formulierung angegeben. Sie dienen als normierte Basis für den rechnerischen Nachweis des Brandverhaltens.

2.3.3.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen

Der Eurocode 3 Teil 1-2 verzichtet völlig auf die Angabe klassifizierter Bekleidungen und schafft die erforderliche normative Basis für den ausschließlich rechnerisch zu führenden brandschutztechnischen Nachweis von Stahlkonstruktionen.

2.3.3.2 Vereinfachte Nachweisverfahren

Für vereinfachte rechnerische Nachweise von Einzelbauteilen werden im Eurocode 3 Teil 1-2 Näherungsverfahren bereitgestellt, die auf den Grundlagen des sog. ECCS-Ver-

fahren beruhen [2/3]. Danach ist für die geforderte Feuerwiderstandsdauer t nachzuweisen, daß die Einwirkungen im Brandfall $E_{fi,d}$ nach Eurocode 1 Teil 2-2 kleiner sind als der Bauteilwiderstand $R_{fi,d,t}$ zur Branddauer t :

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (2.23)$$

Der Bauteilwiderstand $R_{fi,d,t}$ kann bestimmt werden

- a) bei Annahme einer gleichförmigen Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt, indem die kritische Stahltemperatur $\theta_{a,cr}$ nach Gl. (2.24) bzw. Bild 2.10 berechnet wird, oder
- b) indem der Bauteilwiderstand unter Normaltemperatur nach Eurocode 3 Teil 1-1 aufgrund der zum Zeitpunkt t vorhandenen Temperaturbeanspruchung im Stahl modifiziert wird, wobei die temperaturabhängigen Baustoffeigenschaften zu berücksichtigen sind.

Der Verlauf der kritischen Temperatur nach Gl. (2.24) wird aus den temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien durch Auftragen des maximalen Spannungswertes über der Temperatur gewonnen

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln[1/(0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}) - 1] + 482 \quad (2.24)$$

$$\text{mit } \mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0} \quad (2.25)$$

Ausnutzungsfaktor für Bauteile mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3 nach Eurocode 3 Teil 1-1⁺ sowie für Zugglieder;

$R_{fi,d,0}$: Bauteilwiderstand zum Zeitpunkt $t=0$.

⁺ Klassifikation der Querschnitte nach Eurocode 3 Teil 1-1:

Klasse 1: Querschnitte, die ein plastisches Gelenk bilden können mit einer Rotationskapazität, die Schnittgrößenumlagerungen im System erlaubt

Klasse 2: Querschnitte, die ein plastisches Widerstandsmoment entwickeln können, deren Rotationskapazität jedoch begrenzt ist

Klasse 3: Querschnitte, bei welchen die rechnerische Spannung in der maximal gedrückten Stahlfaser die Streckgrenze erreichen kann, aber örtliches Beulen die Ausbildung plastischer Gelenke verhindert

Klasse 4: Querschnitte, bei denen örtliches Beulen den Biege- oder Druckwiderstand beeinflußt und die deshalb nicht bis zur Fließgrenze beansprucht werden können

In DIN 4102 Teil 4 ist ebenfalls eine Funktion zur Beschreibung der kritischen Temperatur enthalten; im Vergleich zur Funktion des Eurocodes 3 Teil 1-2 (Gl. (2.24)) ergibt sie etwa 10 bis 20% kleinere bezogene Festigkeiten (Bild 2.10).

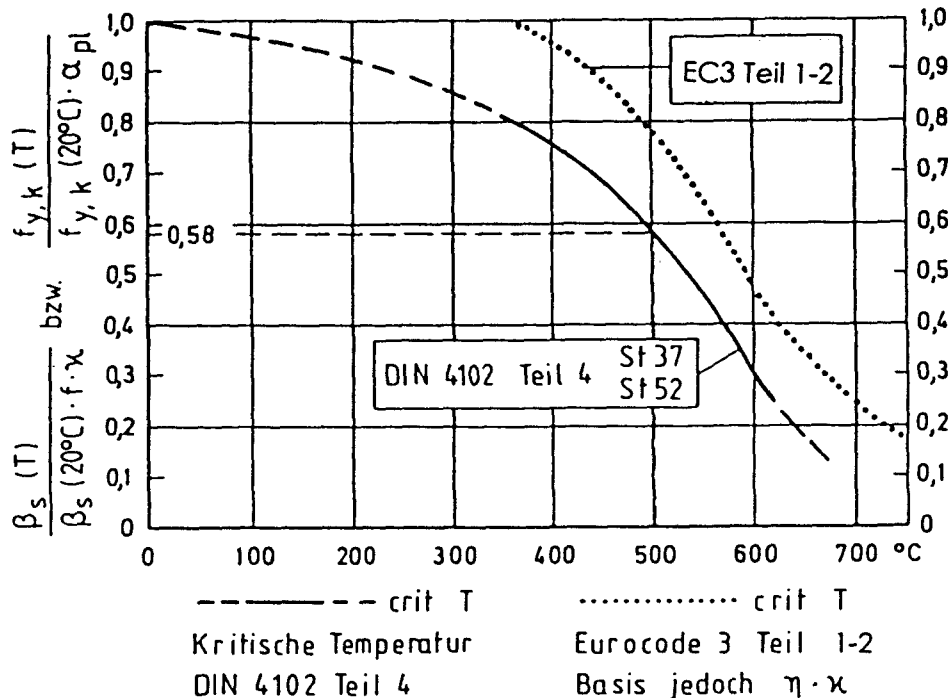


Bild 2.10 Vergleich der Funktionen zur Beschreibung der Festigkeitsabnahme von Baustahl nach DIN 4102 Teil 4 und Eurocode 3 Teil 1-2

Für die Berechnung des Bauteilwiderstandes $R_{fi,d,t}$ unter Berücksichtigung der zum Zeitpunkt t vorhandenen Temperaturbeanspruchung im Stahl (Fall b) werden im Eurocode 3 Teil 1-2 für Zugglieder, Träger, Druckglieder und sonstige Bauteile Rechenanweisungen gegeben. Dabei wird der Widerstand als M_{Rd} , N_{Rd} oder V_{Rd} entsprechend der Einwirkung in Form von Biegemoment, Normalkraft oder Schubkraft bezeichnet.

Zugglieder

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstands $N_{fi,t,Rd}$ wird unter Berücksichtigung einer ungleichförmigen Temperaturbeanspruchung zum Zeitpunkt t nach Gl. (2.26) berechnet:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum A_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{mit } 1 \leq i \leq n \quad (2.26)$$

mit	A_i	Flächenelement des Querschnitts mit der Temperatur θ_i
	$k_{y,\theta,i}$	Reduktionsfaktor für die Fließspannung von Baustahl bei der Temperatur θ_i
	f_y	Fließspannung von Baustahl
	$\gamma_{M,fi}$	Teilsicherheitsfaktor von Baustahl bei Brandbeanspruchung (i.a.: 1,00)
	θ_i	Temperatur im Element mit der Fläche A_i

Alternativ kann der Bauteilwiderstand unter ungleichförmiger Temperaturverteilung $N_{fi,t,Rd}$ dem Bauteilwiderstand unter gleichförmiger Temperaturverteilung $N_{fi,\theta,Rd}$ gleichgesetzt werden, wenn als Stahltemperatur der maximale Wert der ungleichförmigen Temperaturverteilung $\theta_{a,max}$ eingesetzt wird:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} \quad (2.27)$$

mit	$k_{y,\theta}$	Reduktionsfaktor für die Fließspannung von Baustahl bei der Temperatur θ_a
	N_{Rd}	Bauteilwiderstand für Normaltemperatur nach Euro-code 3 Teil 1-1 (5.4.3).

Ohne weiteren Nachweis ist Gl. (2.23) für Zugglieder erfüllt, wenn die Stahltemperatur θ_a zum Zeitpunkt t in keinem Querschnitt größer als [550 °C] ist.

Träger mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstands $M_{fi,t,Rd}$ von Trägern mit Querschnitten der Klasse 1 und 2 wird unter Berücksichtigung einer ungleichförmigen Temperaturbeanspruchung zum Zeitpunkt t nach Gl. (2.28) berechnet:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum A_i \cdot z_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot f_{y,i} / \gamma_{M,fi} \quad \text{mit } 1 \leq i \leq n \quad (2.28)$$

mit	z_i	Abstand vom Mittelpunkt des Flächenelements A_i zur neutralen Achse des vollplastizierten Querschnitts
	$f_{y,i}$	Fließspannung von Baustahl f_y für das Flächenelement A_i ; positiv für Druck, negativ für Zug

für die Bedeutung der Bezeichnungen A_i , $k_{y,\theta,i}$ und $\gamma_{M,fi}$ siehe Gl. (2.26).

Alternativ kann der Bemessungswert des Bauteilwiderstands von Querschnitten der Klasse 1 und 2 unter ungleichförmiger Temperaturverteilung $M_{fi,t,Rd}$ nach Gl. (2.29) bestimmt werden:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / \kappa \quad (2.29)$$

mit $M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot M_{Rd}$
 Bemessungswert des Bauteilwiderstands bei gleichförmiger Temperaturverteilung, wobei die Stahltemperatur θ_a dem maximalen Wert der ungleichförmigen Temperaturverteilung $\theta_{a,max}$ entspricht
 mit M_{Rd} Bemessungswert des Bauteilwiderstandes bei Raumtemperatur
 $k_{y,\theta}$ bezogene temperaturabhängige Fließspannung $f_{y,\theta}/f_y$ nach Bild 2.14

κ Adaptionsfaktor für Träger, der den Einfluß ungleichförmiger Temperaturverteilung und unterschiedlicher Lagerungsbedingungen der Bauteile auf die Versagenstemperatur berücksichtigt (Bild 2.11).

statisch bestimmt:

- allseitig beflammt $\kappa = 1,00$

- dreiseitig beflammt $\kappa = 0,70$

statisch unbestimmt:

- allseitig beflammt $\kappa = 0,85$

- dreiseitig beflammt $\kappa = 0,60$

Ohne weiteren Nachweis ist Gl. (2.23) für Träger mit Querschnitten der Klasse 1 und 2 erfüllt, wenn für

- $\lambda'_{LT} \leq 0,4$ die Stahltemperatur θ_a zum Zeitpunkt t in keinem Querschnitt größer als [550 °C] und für
- $\lambda'_{LT} > 0,4$ nicht größer als [510 °C] ist.

Dabei ist λ'_{LT} die dimensionslose Schlankheit aus der Bemessung bei Normaltemperatur.

Für Träger mit Querschnitten der Klasse 3 gilt Gl. (2.23) als erfüllt, wenn die Stahltemperatur θ_a zum Zeitpunkt t in keinem Querschnitt größer als $[510\text{ °C}]$ ist.

Für $\lambda'_{LT} > 0,4$ wird der Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken $M_{b,fi,t,Rd}$ von seitlich nichtgehaltenen Trägern mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3 zum Zeitpunkt t nach Gl. (2.30) berechnet

$$M_{b,fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} \cdot M_{b,Rd}/1,2 \quad (2.30)$$

mit $k_{y,\theta,max}$ Reduktionsfaktor für die Fließspannung von Baustahl bei der Temperatur θ_a , die dem maximalen Wert bei ungleichförmiger Temperaturverteilung $\theta_{a,max}$ entspricht

$M_{b,Rd}$ Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken bei Normaltemperatur nach Eurocode 3 Teil 1-1 (5.5.2)

1,2 empirisch ermittelter Korrekturfaktor.

Der Bemessungswert des Widerstandes gegen Schub $V_{fi,t,Rd}$ von Trägern mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3 wird unter Berücksichtigung einer ungleichförmigen Temperaturbeanspruchung zum Zeitpunkt t nach Gl. (2.31) berechnet:

$$V_{fi,t,Rd} = V_{fi,\theta,Rd}/\kappa \quad (2.31)$$

mit $V_{fi,\theta,Rd}$ Bemessungswert des Widerstandes gegen Schub bei der Temperatur θ_a , die dem maximalen Wert bei ungleichförmiger Temperaturverteilung $\theta_{a,max}$ entspricht

κ Adaptionfaktor, s. Gl. (2.29).

Bei gleichförmiger Temperaturverteilung θ_a wird der Bemessungswert des Widerstandes gegen Schub $V_{fi,\theta,Rd}$ von Trägern mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3 nach Gl. (2.32) bestimmt:

$$V_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot V_{Rd} \quad (2.32)$$

mit V_{Rd} Bemessungswert des Widerstandes gegen Schub bei Normaltemperatur nach Eurocode 3 Teil 1-1 (5.4.6)

$k_{y,\theta}$ Reduktionsfaktor für die Fließspannung von Baustahl bei der Temperatur θ_a .

Im Bild 2.11 ist der Adaptionfaktor κ für verschiedene Bauteile zusammengestellt.


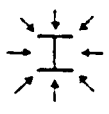

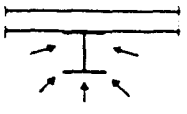

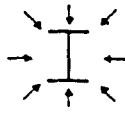
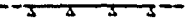
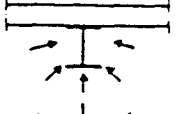
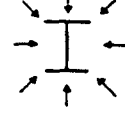
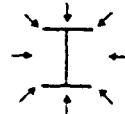
Bauteil	stat. System	Beflammung	Adaptionfaktor κ
Träger			1,00
			0,70
			0,85
			0,60
Stützen	alle Lagerungsbeding.		1,20
Zugglieder	--		1,00

Bild 2.11 Adaptionfaktor κ zur Berücksichtigung unterschiedlicher Lagerungsbedingungen und ungleichförmiger Temperaturverteilung nach Eurocode 3 Teil 1-2

Bauteile unter Druckbeanspruchung mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3

Der Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken $N_{b,fi,t,Rd}$ von Bauteilen unter Druckbeanspruchung mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3 ergibt sich nach Gl. (2.33):

$$N_{b,fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} \cdot N_{b,Rd}/1,2 \quad (2.33)$$

mit $N_{b,Rd}$ Bemessungswert des Widerstands gegen Knicken bei Normaltemperatur nach Eurocode 3 Teil 1-1 (5.5.1), außer daß Knickkurve c maßgebend ist, unabhängig vom Typ des Querschnitts oder der Knickachse.

$k_{y,\theta,max}$ Reduktionsfaktor für die Fließspannung von Baustahl bei der Temperatur θ_a , die dem maximalen Wert bei ungleichförmiger Temperaturverteilung $\theta_{a,max}$ entspricht

1,2 empirisch ermittelter Korrekturfaktor.

Die Bestimmung der Schlankheit erfolgt nach Eurocode 3 Teil 1-1, außer bei Stützen in unverschieblich gehaltenen Rahmen, die in angrenzende Brandabschnitte durchlaufen. Sie können als vollständig eingespannt angesehen werden, wenn die Bauteile, die die Brandabschnitte begrenzen, die gleiche Feuerwiderstandsdauer besitzen wie die betrachtete Stütze.

Der Bemessungswert des Widerstands gegen Knicken $R_{fi,t,d}$ von Bauteilen mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3 unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung und Druck wird zur Branddauer t nach Gl. (2.34) berechnet:

$$R_{fi,t,d} = k_{y,\theta,max} \cdot R_d \quad (2.34)$$

mit R_d Kombination der Beanspruchung aus Biegung und Druck N , M_y und M_z . Die Anforderungen nach Eurocode 3 Teil 1-1 (5.5.4) werden für alle Bauteile bei der Bemessung bei Normaltemperatur erfüllt für

$$N_{Sd} = 1,2 \cdot N$$

$$M_{y,Sd} = M_y$$

$$M_{z,Sd} = M_z$$

Die zusätzlichen Anforderungen nach Eurocode 3 Teil 1-1 für Bauteile, bei denen Biegedrillknicken maßgebend wird, werden erfüllt für

$$N_{Sd} = 1,2 \cdot N$$

$$M_{y,Sd} = 1,2 \cdot M_y$$

$$M_{z,Sd} = M_z$$

Ohne weiteren Nachweis ist Gl. (2.23) für druckbeanspruchte Bauteile und Bauteile mit kombinierter Beanspruchung mit Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3 erfüllt, wenn die Stahltemperatur θ_a zum Zeitpunkt t in keinem Querschnitt größer als $[510^\circ\text{C}]$ ist.

Bauteile - außer Zugglieder - mit Querschnitten der Klasse 4

Ohne weiteren Nachweis ist Gl. (2.23) erfüllt, wenn die Stahltemperatur θ_a zum Zeitpunkt t in keinem Querschnitt größer als 350°C ist.

Temperaturentwicklung im Baustahl

Bei der Berechnung der Temperaturentwicklung wird zwischen unbedeckten und bedeckten Bauteilen sowie zwischen Bauteilen im Innern und außerhalb eines Gebäudes unterschieden. Im folgenden wird die Temperaturermittlung für Bauteile im Innern eines Gebäudes beschrieben.

Die gleichförmige Temperaturverteilung in einem unbedeckten Querschnitt wird nach Gl. (2.35) als Temperaturerhöhung $\Delta\theta_{a,t}$ im Zeitintervall Δt berechnet

$$\Delta\theta_{a,t} = 1/(c_a \cdot \rho_a) \cdot A_m/V \cdot h'_{net,d} \cdot \Delta t \quad (2.35)$$

mit	c_a	spez. Wärmekapazität des Baustahls $[\text{J}/\text{kgK}]$
	ρ_a	Dichte von Baustahl $[\text{kg}/\text{m}^3]$
	A_m/V	Profilmassfaktor, $A_m/V \geq 10 \text{ m}^{-1}$
	A_m	vom Brand beanspruchte Oberfläche des Bauteils je m $[\text{m}^2/\text{m}]$
	V	Volumen des Stahlprofils je m $[\text{m}^3/\text{m}]$
	$h'_{net,d}$	Bemessungswert des Wärmestroms (s. Abschnitt 2.3.1)
	Δt	Zeitintervall ≤ 5 Sekunden.

Im Bild 2.12 ist die Temperaturentwicklung unbekleideter Stahlbauteile nach Gl. (2.35) für unterschiedliche Profilfaktoren dargestellt.

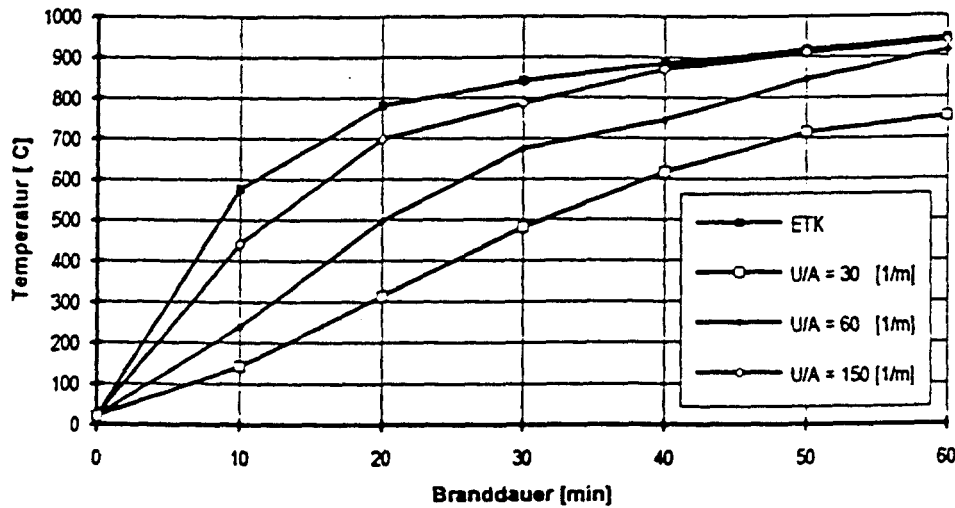


Bild 2.12 Temperaturentwicklung in unbekleideten Stahlbauteilen nach Eurocode 3 Teil 1-2 für unterschiedliche Profilfaktoren ($U/A = A_m/V$)

Die gleichförmige Temperaturverteilung in einem bekleideten Querschnitt wird nach Gl. (2.36) als Temperaturerhöhung $\Delta\theta_{a,t}$ im Zeitintervall Δt berechnet

$$\Delta\theta_{a,t} = (\lambda_p/d_p)/(c_a \cdot \rho_a) \cdot A_p/V \cdot [1/(1+\phi/3)] \cdot (\theta_t - \theta_a) \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_t \quad (2.36)$$

wobei $\phi = (c_p \cdot \rho_p)/(c_a \cdot \rho_a) \cdot d_p \cdot A_p/V$

mit A_p/V	Profilfaktor für bekleidete Bauteile
A_p	maßgebende Oberfläche der Bekleidung je m [m^2/m]
V	Volumen des Stahlprofils je m [m^3/m]
c_a	spez. Wärmekapazität des Baustahls [J/kgK]
c_p	spez. Wärmekapazität der Bekleidung [J/kgK]
d_p	Dicke der Bekleidung [m]
Δt	Zeitintervall ≤ 30 Sekunden
θ_t	umgebende Heißgastemperatur zum Zeitpunkt t
$\theta_{a,t}$	Baustahltemperatur zum Zeitpunkt t
$\Delta\theta_t$	Anstieg der umgebenden Heißgastemperatur im Zeitintervall Δt
λ_p	Wärmeleitfähigkeit des Bekleidungsmaterials [W/mK]
ρ_a	Dichte des Baustahls [kg/m^3]
ρ_p	Dichte des Bekleidungsmaterials [kg/m^3].

2.3.3.3 Exakte Nachweisverfahren

Die Kennwerte der thermischen und mechanischen Hochtemperatureigenschaften dienen als Grundlage "exakter" Rechenverfahren [2/4, 2/8 und 2/17]. Im Eurocode 3 Teil 1-2 sind diese Grundlagen unmittelbar in der Norm zusammengestellt. Die generellen Hinweise zum Anwendungsbereich, zum Umfang und zu den Grenzen von exakten Rechenverfahren entsprechen denjenigen im Eurocode 2 Teil 1-2 (s. Abschnitt 2.3.2.3).

Mechanische Stoffwerte von Baustahl

Für Aufheizgeschwindigkeiten zwischen 2 und 50 K/min werden die im Bild 2.13 dargestellten temperaturabhängigen Spannungs/Dehnungslinien bereitgestellt. Sie werden nach dem im Bild 2.5 gezeigten Modell und den zugehörigen Gleichungen zusammen mit den temperaturabhängigen Modell-Parametern für die effektive Fließspannung $k_{y,\theta}$, die Proportionalitätsgrenze $k_{p,\theta}$ und die Steigung im linear-elastischen Bereich $E_{a,\theta}$ nach Bild 2.14 beschrieben.

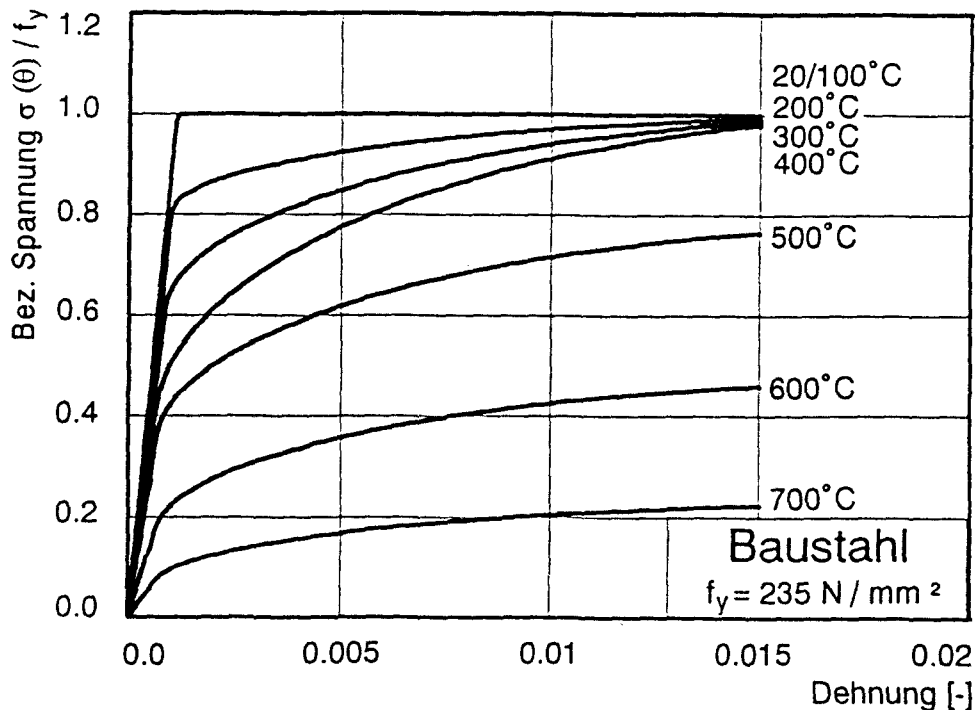
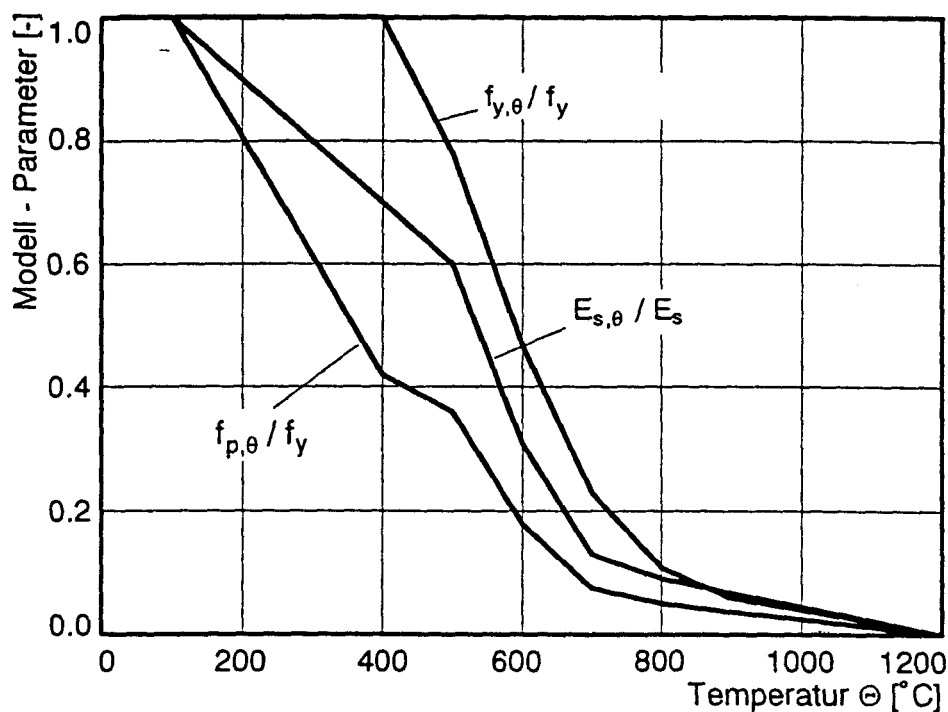


Bild 2.13 Temperaturabhängige Spannungs/Dehnungslinien von Baustahl



	Bezogene temperaturabhängige Parameter		
Stahltemperatur Θ [°C]	effektive Fließspannung $f_{y,\Theta} / f_y$	Proportionalitätsgrenze $f_{p,\Theta} / f_y$	Steigung des linear elast. Bereichs $E_{s,\Theta} / E_s$
20	1.000	1.0000	1.0000
100	1.000	1.0000	1.0000
200	1.000	0.8070	0.9000
300	1.000	0.6130	0.8000
400	1.000	0.4200	0.7000
500	0.780	0.3600	0.6000
600	0.470	0.1800	0.3100
700	0.230	0.0750	0.1300
800	0.110	0.0500	0.0900
900	0.060	0.0375	0.0675
1000	0.040	0.0250	0.0450
1100	0.020	0.0125	0.0225
1200	0.000	0.0000	0.0000

Bild 2.14 Temperaturabhängige Modell-Parameter für Spannungs/Dehnungslinien von Baustahl

Eine Variante für die im Bild 2.13 dargestellten Spannungs/Dehnungslinien wird im Anhang des Eurocodes 3 Teil 1-2 bereitgestellt: dort werden für Temperaturen unter 400 °C Spannungs/Dehnungslinien formuliert, die das sog. "strain-hardening" berücksichtigen.

Im normativen Teil des Eurocodes 3 Teil 1-2 wird für die Dichte von Baustahl der temperaturunabhängige Wert

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$$

vorgeschlagen.

Thermische Stoffwerte von Baustahl und Bekleidungen

Für Baustahl sind im Eurocode 3 Teil 1-2 funktionale und graphische Darstellungen für den temperaturabhängigen Verlauf der thermischen Dehnung $\epsilon_{th,a}$, der spezifischen Wärmekapazität c_a und der Wärmeleitfähigkeit λ_a enthalten.

Für eine vereinfachte Berechnung der Temperatur des Baustahls können

- $\epsilon_{th,a} = 14 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta_a - 20)$ mit θ_a : Baustahl-Temperatur [°C]
- $c_a = 600 \text{ [J/kgK]}$
- $\lambda_a = 45 \text{ [W/mK]}$

benutzt werden.

Für Bekleidungen werden keine thermischen Stoffwerte angegeben, sondern es wird auf die entsprechenden Normen ENyyy5-1 oder ENyyy5-3 verwiesen.

2.3.3.4 Zusammenfassung

Nach dem Eurocode 3 Teil 1-2 können Nachweise für stabförmige Einzelbauteile - Träger und Stützen - als Ersatz für eine Brandprüfung unter Ansatz der standardisierten Temperaturzeitverläufe geführt werden. Raumabschließende Bauteile werden nicht behandelt. Für die Berechnung von komplexeren Strukturen kann alternativ ein natürli-

cher Brand angenommen werden; dieser kann einzelne Bauteile oder das Gesamtsystem thermisch beanspruchen. Bei den vereinfachten Nachweisverfahren wird der mit zunehmender Stahltemperatur abnehmende Bemessungswert des Bauteilwiderstandes aus der Beanspruchbarkeit bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit einem Abminderungsfaktor berechnet.

Ein Hauptanwendungsfall rechnerischer Brandschutznachweise für Stahlbauteile wird sein, Ergebnisse aus Normbrandversuchen an bekleideten Stahlstützen und -trägern auf andere Lastausnutzungsgrade, statische Randbedingungen und andere A_p/V -Werte zu extrapolieren. Zur rechnerischen Erfassung des Wärmeisulationsverhaltens der Brandschutzbekleidung werden deren thermische Stoffwerte benötigt, die in CEN-Normen geregelt werden sollen.

Genauere Nachweise für Gesamttragwerke, z. B. Rahmensysteme, sind grundsätzlich möglich, wobei die derzeit fehlenden Rechengrundlagen für die Anschlußkonstruktionen aus der Fachliteratur entnommen werden müssen [2/18].

Tabelle 2.2 zeigt die im Eurocode 3 Teil 1-2 behandelten Nachweisarten.

Tabelle 2.2 Übersicht über die in Eurocode 3 Teil 1-2 behandelten Brandschutznachweise

Bauteile	Tabellen/ Tafeln	Nachweismethode	
		Vereinfachte Nachweise	"exakte" Nachweise
Decken	-	-	-
Balken	-	x	x
Wände	-	-	-
Stützen	-	x	x
Zugglieder	-	x	x
Teilsysteme, Gesamtsysteme	-	bedingt	bedingt

2.3.4 Eurocode 4 Teil 1-2

Im Eurocode 4 Teil 1-2 [2/7] sind für die brandschutztechnische Bemessung Tabellen sowie vereinfachte und "exakte" Nachweisverfahren enthalten.

Im Eurocode 4 Teil 1-2 werden Angaben des Eurocodes 1 Teil 2-2 hinsichtlich der thermischen Einwirkungen genauer spezifiziert: für den Emissionsgrad der Bauteiloberfläche wird im Eurocode 4 Teil 1-2 für Stahl der Wert $\epsilon_m = [0,625]$ und für Beton $\epsilon_m = [0,7]$ empfohlen (s. auch Abschnitt 2.3.1.1).

2.3.4.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen

Im Eurocode 4 Teil 1-2 sind für die brandschutztechnische Bemessung Tabellen enthalten für

- Verbundträger mit Kammerbeton,
- Verbundstützen mit einbetoniertem Querschnitt,
- Verbundstützen mit teilweise einbetoniertem Querschnitt und
- Verbundstützen mit betongefülltem Querschnitt.

Die Tabellen enthalten Mindestquerschnittsabmessungen und im Fall der Verbundträger das erforderliche Verhältnis von Zulagebewehrung zur Untergurtfläche. Die Angaben sind jeweils für das Lastniveau $\eta_{fi,t} = 0,3, 0,5$ und $0,7$ sowie für die Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 180 gemacht; dabei entspricht $\eta_{fi,t}$ der Definition nach Gl. (2.10).

Die Werte der Bemessungstabellen im Eurocode 4 Teil 1-2 gelten für die Standard-Temperaturzeitkurve nach Gl. (2.3).

Neben den Bemessungstabellen in der Norm enthalten die normativen Anhänge F und G Traglastdiagramme für Verbundstützen mit teilweise einbetoniertem Querschnitt und für Verbundstützen mit betongefülltem Querschnitt. Die Angaben sind Ergebnisse aus Berechnungen mit exakten oder vereinfachten Verfahren. Es ist zu beachten, daß eine Extrapolation über die untersuchten Bereiche hinaus nicht zulässig ist.

2.3.4.2 Vereinfachte Nachweisverfahren

Im Eurocode 4 Teil 1-2 werden vereinfachte Rechenverfahren bereitgestellt für

- geschützte und ungeschützte Verbunddecken,
- Verbundträger mit und ohne Kammerbeton,
- Stahlträger mit Kammerbeton und
- Verbundstützen.

Ungeschützte Verbunddecken

Das Rechenverfahren im Eurocode 4 Teil 1-2 zum Nachweis der Feuerwiderstandsklasse von ungeschützten Verbunddecken, speziell Stahlprofilblechdecken, stammt aus [2/3]. Es kann für statisch bestimmt gelagerte und als Durchlaufkonstruktion ausgeführte Verbunddecken angewendet werden. Mit dem vereinfachten Verfahren wird die Verbunddecke hinsichtlich ausreichender thermischer Isolierung und Tragfähigkeit bemessen. Bei der Bemessung wird der Feuerwiderstand durch die Wahl der Deckendicke und die Menge der Zulagebewehrung, die im Brandfall Lastanteile der temperaturbedingt entfestigten Stahlprofilbleche übernimmt, gewährleistet. Bei dem vereinfachten Verfahren wird die Tragwirkung des Stahlprofilbleches im Brandfall vollständig vernachlässigt.

Im einzelnen müssen folgende Bemessungsschritte durchgeführt werden:

- a) Ermittlung der erforderlichen Deckendicke h_{eff} nach Gl. (2.37) und Bild 2.15, um die Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen thermischen Isolierung (Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgewandten Seite im Mittel um 140 K und an einzelnen Stellen um 180 K) zu erfüllen

$$h_{\text{eff}} = h_1 + 0,5 \cdot h_2 \cdot [(l_1 + l_2)/(l_1 + l_3)] \quad h_2/h_1 \leq 1,5 \text{ und } h_1 > 40 \text{ mm} \quad (2.37a)$$

$$h_{\text{eff}} = h_1 \cdot \{1 + 0,75 \cdot [(l_1 + l_2)/(l_1 + l_3)]\} \quad h_2/h_1 > 1,5 \text{ und } h_1 > 40 \text{ mm} \quad (2.37b)$$

$$h_{\text{eff}} = h_1 \quad l_3 > 2 \cdot l_1 \quad (2.37c)$$

Die berechnete Deckendicke h_{eff} nach Gl. (2.37) muß gleich oder größer der Minstdicke sein, die in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsdauer im Eurocode 4 Teil 1-2 tabellarisch zusammengestellt ist.

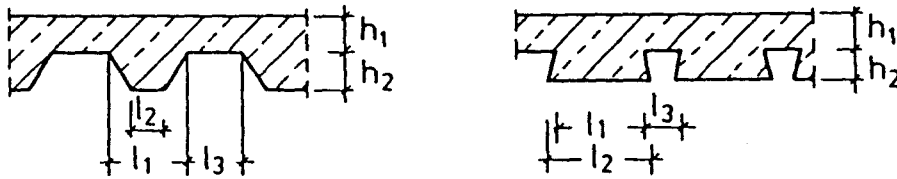


Bild 2.15 Querschnittsbezeichnungen von Verbunddecken

- b) Berechnung der Feuerwiderstandsdauer nach dem Traglastverfahren mit Ermittlung der Bemessungswerte der Bauteilwiderstände im Feldbereich $M_{fi,Rd}^+$ und im Auflagerbereich $M_{fi,Rd}^-$ der Verbunddecke. Für die Ermittlung der Temperatur in der Bewehrung bzw. im Betonquerschnitt werden Gleichungen bzw. Diagramme mit Temperaturverteilungen angegeben.

Geschützte Verbunddecken

Durch den Schutz des Stahlprofilblechs gegen direkte Wärmeeinwirkung kann die Feuerwiderstandsfähigkeit der Verbunddecke erhöht werden. Das thermische Verhalten des Schutzsystems muß entsprechend der Normen EN yyy 5-1A bzw. EN yyy 5-4A beurteilt werden.

Ohne weiteren Nachweis gilt das Tragverhalten als gesichert, wenn die Temperatur des Stahlprofilblechs 350 °C nicht übersteigt.

Verbundträger ohne Kammerbeton

Das vereinfachte Nachweisverfahren kann für statisch bestimmt gelagerte Verbundträger ohne Kammerbeton angewendet werden.

Die Erwärmung der Stahlträger wird mit Gl. (2.35) für unbekleidete und mit Gl. (2.36) für bekleidete Träger ermittelt. Vereinfachend dürfen dabei die Flansch- und Stegbereiche der Träger als einzelne Bauteile betrachtet werden, zwischen denen kein Wärmeaustausch stattfindet. Ebenfalls kann der Wärmetransport in den Betongurt, d. h. die Deckenplatte, vernachlässigt werden. Die Erwärmung des Betongurts wird aus den Diagrammen mit der Temperaturverteilung der ungeschützten Verbunddecke entnommen.

Das Tragverhalten von Verbundträgern ohne Kammerbeton, bei denen das Stahlprofil nicht höher als 500 mm und die Dicke des Betongurts größer als 120 mm ist, kann mit Hilfe der kritischen Temperatur für das Lastniveau $\eta_{fi,t}$ und der temperaturbedingten Reduktion der Stahlfestigkeit $f_{a,max,\theta_{cr}}$ nach Gl. (2.38) bestimmt werden:

$$0,9 \cdot \eta_{fi,t} = f_{a,max,\theta_{cr}} / f_{ay,20^{\circ}C} \quad (2.38)$$

mit $\eta_{fi,t} = E_{fi,d,t} / R_d$
 $f_{a,max,\theta_{cr}}$ effektive Fließspannung nach Bild 2.14 für die Temperatur im Stahlprofil θ_{cr} .

Eine ausreichende Tragfähigkeit gilt als nachgewiesen, wenn die vorhandene Temperatur im Stahlprofil, ermittelt mit Gl. (2.35) oder (2.36), gleich oder kleiner ist als die kritische Temperatur nach Gl. (2.38).

Für Verbundträger, deren Stahlprofil höher als 500 mm oder deren Betongurt kleiner als 120 mm ist, kann die Biegetragfähigkeit mit Hilfe des Traglastverfahrens ermittelt werden. Dazu werden im Anhang des Eurocodes 4 Teil 1-2 detaillierte Angaben gemacht.

Verbundträger mit Kammerbeton

Das vereinfachte Nachweisverfahren für Verbundträger mit Kammerbeton basiert auf dem Traglastverfahren [2/13]. Mit dem Verfahren können Klassifizierungen von R 30 bis R 180 für statisch bestimmt gelagerte und durchlaufende Verbundträger vorgenommen werden.

Der Temperatureinfluß auf das Baustoffverhalten kann durch Berücksichtigung reduzierter Querschnittsabmessungen oder durch Reduktion der mechanischen Festigkeitseigenschaften erfolgen.

Zur Ermittlung des Bemessungsmoments im Feld $M_{fi,Rd}^{+}$ werden der Beton im Druckbereich der Decke, der Obergurt, Steg und Untergurt des Stahlprofils sowie die Bewehrung in den ausbetonierten Kammern berücksichtigt. Zur Ermittlung des Bemessungsmomentes über dem Auflager $M_{fi,Rd}^{-}$ wird die Bewehrung in der Deckenplatte, der Obergurt des Stahlprofils und der Kammerbeton, der im Druckbereich liegt,

berücksichtigt. Dem Anhang vom Eurocode 4 Teil 1-2 können - nach Feuerwiderstandsdauern geordnet - die Reduktionsfaktoren für die Querschnittsabmessungen bzw. den Festigkeitseigenschaften entnommen werden.

Stahlträger mit Kammerbeton

In diesem Fall besteht zwischen dem Stahlträger mit Kammerbeton und der Betondecke kein Schubverbund. Die Ermittlung der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung wird mit den vereinfachten Berechnungsverfahren für Verbundträger mit Kammerbeton ausgeführt.

Verbundstützen

Im Eurocode 4 Teil 1-2 ist ein vereinfachtes Nachweisverfahren für Verbundstützen in ausgesteiften Rahmen enthalten. Der Bemessungswert für den Bauteilwiderstand wird nach Gl. (2.39) berechnet

$$N_{fi,Rd} = \chi \cdot N_{fi,pl,Rd} \quad (2.39)$$

mit χ Koeffizient der Knickkurve c von Eurocode 3 Teil 1-1 (5.5.1), abhängig vom dimensionslosen Schlankheitswert

$$\lambda_{\theta}' = (N_{fi,pl,R} / N_{fi,cr})^{0,5} \quad (2.40)$$

mit $N_{fi,pl,R} = N_{fi,pl,Rd}$ nach Gl. (2.41) mit

$$\gamma_{M,fi,a} = \gamma_{M,fi,s} = \gamma_{M,fi,c} = 1,0$$

$$N_{fi,cr} = \pi^2 \cdot (EI)_{fi,eff} / l_{\theta}^2 \quad (2.41)$$

$(EI)_{fi,eff}$ s. Gl. (2.43)

l_{θ} : Knicklänge im Brandfall

$N_{fi,pl,Rd}$ Bemessungswert des plastischen Bauteilwiderstandes bei Druckbeanspruchung unter Brandeinwirkung.

Der Bemessungswert des plastischen Bauteilwiderstandes bei Druckbeanspruchung unter Brandeinwirkung $N_{fi,pl,Rd}$ wird berechnet, indem der Querschnitt der Verbundstütze in Elemente des Stahlprofils "a", der Betonstahlbewehrung "s" und des Betons "c"

unterteilt wird. $N_{fi,pl,Rd}$ ergibt sich dann durch Summation über die einzelnen Elemente nach Gl. (2.42):

$$N_{fi,pl,Rd} = \frac{\sum(A_{a,\theta} \cdot f_{a,max,\theta})}{\gamma_{M,fi,a}} + \frac{\sum(A_{s,\theta} \cdot f_{s,max,\theta})}{\gamma_{M,fi,s}} + \frac{\sum(A_{c,\theta} \cdot f_{c,\theta})}{\gamma_{M,fi,c}} \quad (2.42)$$

mit $A_{i,\theta}$ Fläche des Elements i im Querschnitt; wobei die Elemente $i = "a"$ über das Stahlprofil, $i = "s"$ über die Bewehrungseinlagen und $i = "c"$ über den Beton summiert werden.

Die effektive Biegesteifigkeit $(EI)_{fi,eff}$ zur Berechnung der Euler-Knicklast bzw. der elastischen kritischen Last unter Brandeinwirkung ergibt sich aus Gl. (2.43)

$$(EI)_{fi,eff} = \sum(\varphi_{a,\theta} \cdot E_{a,\theta} \cdot I_{a,\theta}) + \sum(\varphi_{s,\theta} \cdot E_{s,\theta} \cdot I_{s,\theta}) + \sum(\varphi_{c,\theta} \cdot E_{c,\theta} \cdot I_{c,\theta}) \quad (2.43)$$

mit $I_{i,\theta}$ Trägheitsmoment des Teils i um die schwache oder starke Achse; wobei die Elemente $i = "a"$ über das Stahlprofil, $i = "s"$ über die Bewehrungseinlagen und $i = "c"$ über den Beton summiert werden

$\varphi_{i,\theta}$ Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung des thermischen Einflusses; Werte für den Reduktionsfaktor sind in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsdauer im Anhang des Eurocodes 4 Teil 1-2 zusammengestellt.

Im Eurocode 4 Teil 1-2 werden Anwendungsgrenzen für vereinfachte Nachweisverfahren für Verbundstützen mit teilweise einbetoniertem Querschnitt und für Verbundstützen mit betongefülltem Querschnitt bereitgestellt.

2.3.4.3 Exakte Nachweisverfahren

Im Eurocode 4 Teil 1-2 sind die für die exakten Nachweisverfahren benötigten Kennwerte für die thermischen und mechanischen Hochtemperatureigenschaften der Baustoffe Baustahl, Betonstahl und Beton entsprechend den Angaben im Eurocode 3 Teil 1-2 bzw. Eurocode 2 Teil 1-2 definiert.

2.3.4.4 Zusammenfassung

Für Regelfälle sind im Eurocode 4 Teil 1-2 als einfachste Nachweisform Nachweise mit Hilfe von Tabellen für Träger und Stützen vorgesehen. Für Verbundstützen mit einbetoniertem Querschnitt erübrigt sich ein vereinfachter rechnerischer Nachweis, da diese Stützenform schon bei der vorgeschriebenen Mindestbetondeckung des Stahlprofils von 40 mm in der Regel Feuerwiderstandsdauern von mehr als 60 min erreicht und bei der aus herstellungstechnischen Gründen zu empfehlenden Betondeckung von 50 mm feuerbeständig (R 90) ist [2/9]. Ihr Brandverhalten kann mit ausreichender Wirtschaftlichkeit durch die Vorgabe der Querschnittsabmessungen und der Betondeckung von Bewehrung und Stahlprofilen nach den Angaben im Eurocode 4 Teil 1-2 beschrieben werden.

Vereinfachte rechnerische Nachweisverfahren werden für Verbundträger und -stützen mit kammerbetonierten I-Profilen und betongefüllten Hohlprofilen sowie für Verbunddecken mit Stahlprofilblechen angeboten.

Exakte Rechenverfahren müssen den Einfluß von geometrischen und physikalischen Nichtlinearitäten in geeigneter Weise berücksichtigen. Hierfür werden die Rechengrundlagen (Wärmeübergang, Materialgesetze) entsprechend den Angaben im Eurocode 2 Teil 1-2 und Eurocode 3 Teil 1-2 bereitgestellt. Hinsichtlich der Gesamttragwerksnachweise gilt die gleiche Einschränkung wie bei Stahlkonstruktionen, daß die noch fehlenden Rechengrundlagen für Anschlußkonstruktionen der Literatur, z. B. [2/18] entnommen werden müssen.

Die zur Zeit im Eurocode 4 Teil 1-2 enthaltenen Nachweisarten sind nochmals in Tabelle 2.3 gezeigt.

Im Hinblick auf die wirtschaftlichen Vorteile, die eine brandschutztechnische Bemessung mit vereinfachten Nachweisverfahren erlaubt, wurde für Verbundträger mit Kammerbeton in [2/12] ein weiteres Verfahren entwickelt. Es ist mit den im Eurocode 4 Teil 1-2 definierten Grundlagen für vereinfachte Nachweisverfahren kompatibel.

Im Bild 2.16 werden die nach Eurocode 4 Teil 1-2 und nach [2/12] berechneten aufnehmbaren Biegemomente eines Verbundträgers aus einem HE 300 AA mit schubfest verbundener, 12 cm dicker Stahlbetonplatte für unterschiedliche Feuerwiderstandsklassen verglichen. Zusätzlich ist ein Versuchsergebnis aus [2/14] eingetragen.

Tabelle 2.3 Übersicht über die in Eurocode 4 Teil 1-2 behandelten Brandschutz-nachweise

Bauteile	Tabellen/ Tafeln	Nachweismethode Vereinfachte Nachweise	"exakte" Nachweise
Decken	-	x	-
Träger	x	x	x
Wände	-	-	-
Stützen	x	nur für I-Profile mit Kammerbeton und betongefüllte Hohlprofile	x
Teilsysteme, Gesamtsysteme	-	bedingt	bedingt

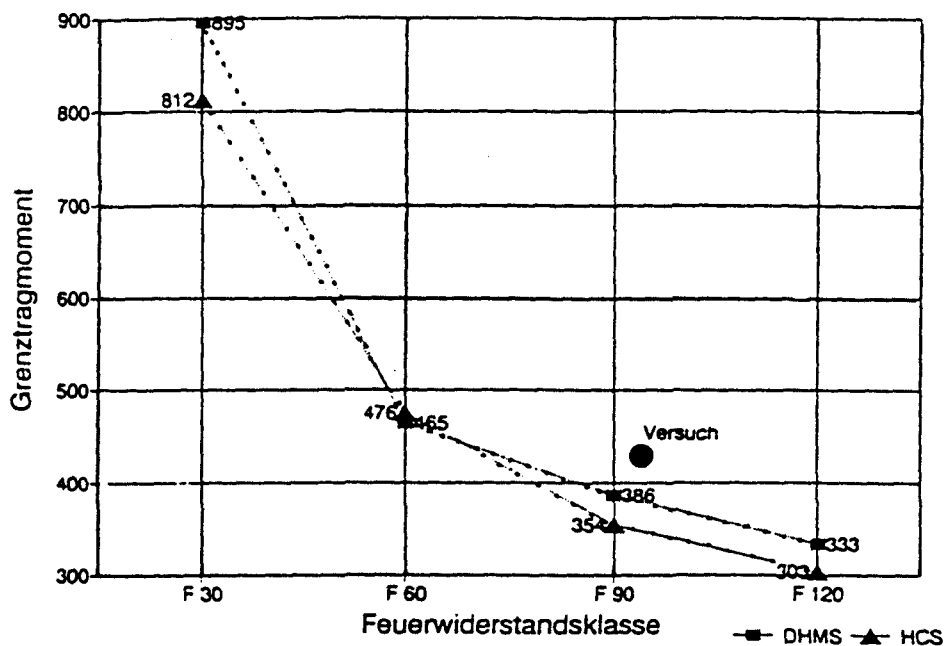


Bild 2.16 Vergleich der Rechengenergebnisse nach Eurocode 4 Teil 1-2 und nach [2/12] am Beispiel eines einfeldrigen Verbundträgers aus einem Stahlprofil HE 300 AA mit schubfest verbundener, 12 cm dicker Stahlbetonplatte in Abhängigkeit der Feuerwiderstandsklasse [2/15]

Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens [2/11] wurde ein vereinfachtes Nachweisverfahren für Verbundstützen mit teilweise einbetoniertem Querschnitt entwickelt, mit dem auch die Feuerwiderstandsklasse R 180 sowie Biegung um die starke Querschnittsachse bei zentrischer oder exzentrischer Belastung berechnet werden kann. Bei diesem Verfahren werden Reduktionsfaktoren für Festigkeit und E-Modul in Abhängigkeit von der Querschnittsfläche bestimmt und damit die plastische Normalkraft der Stütze zum untersuchten Zeitpunkt und eine wirksame Biegesteifigkeit berechnet. Der weitere Rechengang orientiert sich an der Vorgehensweise des vereinfachten Nachweisverfahrens der DIN 18 806 Teil 1 (03.84) Abschnitt 5, wobei jedoch für den Brandfall gültige Knickspannungskurven verwendet werden. Das Verfahren ist in [2/11], [2/21] dokumentiert.

2.3.5 Eurocode 5 Teil 1-2

2.3.5.1 Brandschutztechnische Bemessung mit Tabellen

Der Eurocode 5 Teil 1-2 verzichtet auf die Angaben tabellierter Mindestquerschnittsabmessungen für Bauteile aus Holz (Wände, Stützen und Balken). Er stellt aber alle erforderlichen Grundlagen für die Erstellung von Bemessungshilfen zur Verfügung.

2.3.5.2 Vereinfachte Nachweisverfahren

Das Tragverhalten von Holzbauteilen bei Brandbeanspruchung wird - neben der Temperaturentwicklung im Querschnitt - vor allem durch den Abbrand des äußeren, dem Feuer direkt ausgesetzten Querschnittsbereichs beeinflusst.

Der Eurocode 5 Teil 1-2 bietet für die brandschutztechnische Bemessung tragender Holzbauteile zwei vereinfachende rechnerische Verfahren an, die beide von der Abbrandrate v [mm/min] ausgehen und damit eine bestimmte Abbrandtiefe d nach t Minuten Brandbeanspruchung berechnen. Die Abbrandrate wird im Eurocode 5 Teil 1-2, Tabelle 3.1 in Abhängigkeit der Holzsorte (Vollholz, Brettschichtholz, u. a.) vorgegeben.

Effective cross-section method

Bei der effective cross-section method, in Deutschland als Δd -Verfahren bezeichnet, wird die Abbrandtiefe d um einen Betrag Δd erhöht, so daß der Tragfähigkeitsnachweis für den verbleibende Restquerschnitt mit den Festigkeits- und Verformungseigenschaften bei Normaltemperatur durchgeführt werden kann. So ergibt sich der Restquerschnitt bei 4seitiger Brandbeanspruchung zu:

$$b_r = b(t) = b - 2 \cdot (d + \Delta d)$$

$$h_r = h(t) = h - 2 \cdot (d + \Delta d)$$

Der Betrag Δd wird im Eurocode 5 Teil 1-2, Tabelle 4.1 als zeitabhängige Größe definiert, wobei zusätzlich zu berücksichtigen ist, ob die beflamnte Oberfläche geschützt oder ungeschützt dem Feuer ausgesetzt wird.

Reduced strength and stiffness method

Die reduced strength and stiffness method (T_m -Verfahren) kann für Holzbauteile unter Normbrandbedingungen angewendet werden, die unter Biege-, Druck- oder Zugbeanspruchung stehen. Im Anhang A (normativ) vom Eurocode 5 Teil 1-2 sind Angaben zum Rechenverfahren enthalten. Danach besteht die Möglichkeit, bei der Berechnung der Abbrandtiefe zusätzlich Querschnittsverluste an den Ecken zu berücksichtigen, also mit abgerundeten Querschnitten zu rechnen. Für die temperaturabhängige Reduzierung der Biege-, Druck- und Zugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls werden Rechenfunktionen in Abhängigkeit vom Verhältnis des beflamnten Umfangs des Restquerschnitts zur Fläche des Restquerschnitts angegeben.

2.3.5.3 Exakte Nachweisverfahren

Zur Anwendung exakter Nachweisverfahren werden im Eurocode 5 Teil 1-2, Abschnitt 4.3 lediglich generelle Hinweise gegeben. Zusätzlich sind im Anhang E einige thermische Stoffwerte zur Berechnung der Temperaturverteilung im Querschnitt aufgeführt, es fehlen aber genauere Angaben über die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Stoffwerte, abgesehen von den linearisierten Beziehungen, die im Abschnitt 2.3.5.2 erwähnt worden sind.

2.3.5.4 Zusammenfassung

In dem derzeitigen Entwurf des Eurocode 5 Teil 1-2 [2/24] sind nur rechnerische Nachweise für die Brandschutzfunktion "Tragfähigkeit" (Kriterium "R") geregelt; hinsichtlich der raumabschließenden Funktion (Kriterien "E" und "I") finden sich konstruktive Regeln in einem Anhang. Die rechnerischen Nachweise beschränken sich auf Einzelbauteile. Analytische Verfahren für tragende Wände und Decken sowie für Teilsysteme und Gesamttragwerke fehlen.

Die thermomechanischen Materialkennwerte haben für die vereinfachten Praxisnachweise nur eine untergeordnete Bedeutung. Hierfür ist hauptsächlich die Abbrandrate maßgebend, die für verschiedene Bauteilarten angegeben ist; für natürliche Brandverläufe werden Abbrandraten aufgrund neuerer Forschungsergebnisse in einem Anhang definiert. Bei bekleideten Holzbauteilen darf der verzögerte Abbrand nach dem Versagen der Bekleidung berücksichtigt werden.

Tabelle 2.4 gibt eine Übersicht über die derzeit geregelten Nachweise.

Tabelle 2.4 Übersicht über die im Eurocode 5 Teil 1-2 behandelten Brandschutznachweise

Bauteile	Tabellen/ Tafeln	Nachweismethode	
		Vereinfachte Nachweise	"exakte" Nachweise
Decken	1)	2)	-
Balken	-	x	-
Wände	1)	2)	-
Stützen	-	x	-
Zugglieder	-	x	-
Teilsysteme, Gesamtsysteme	Verbindungen konstruktiv behandelt	-	-

1) konstruktive Regeln 2) in bezug auf die Abbrandverzögerung

Eine Reihe von Einzelfragen werden im EC 5 realistischer und flexibler behandelt als bisher in Deutschland üblich, z. B. die Kippaussteifung bei schlanken Balken analog zur

Kaltbemessung, das Schubversagen im Auflagerbereich von Balken und bei Querschnitten mit Durchbrüchen sowie die Beanspruchung auf Biegung mit Normalkraft. In einem Anhang werden detaillierte Hinweise zur konstruktiven Durchbildung von Anschlüssen auf der Grundlage von Prüferfahrungen sowie neueren Forschungsergebnissen gegeben.

2.4 Vorgaben zum Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept der Eurocodes verlangt, daß im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Bemessungsschnittgrößen aus den anzusetzenden Beanspruchungen der Einwirkungen kleiner sein müssen als die vom Tragwerk oder dem Querschnitt aufzunehmenden Werte des Widerstandes oder der ertragbaren Spannungen bzw. Formänderungen.

Auf der Widerstandsseite wird von charakteristischen Werten der Baustoffkennwerte ausgegangen, die im allgemeinen als 5%-Fraktile definiert sind. Zur Ermittlung der Bemessungswerte werden die charakteristischen Werte durch die von der Verteilungsdichte der Baustoffe abhängigen Teilsicherheitsbeiwerte γ_M dividiert.

Auf der Einwirkungsseite, d. h. bei den Belastungen oder Zwangbeanspruchungen, werden ebenfalls Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt werden, die von der Belastungsart und dem Grenzzustand abhängig sind. Sie werden mit den charakteristischen Werten der Einwirkungen multipliziert, um deren Bemessungswerte zu erhalten.

2.4.1 Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi}$

Für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist der Bemessungswert der thermischen und mechanischen Baustoffkennwerte $X_{fi,d}$ aus den charakteristischen Baustoffkennwerten X_k unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,fi}$ nach Gl. (2.44) zu berechnen. Bei den thermischen Kennwerten muß unterschieden werden, ob eine Vergrößerung des Kennwertes die Sicherheit erhöht

$$X_{fi,d} = X_{k,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (2.44a)$$

oder die Sicherheit verkleinert

$$X_{fi,d} = X_{k,\theta} \cdot \gamma_{M,fi} \quad (2.44b)$$

Nach Eurocode 2, 3 und 4, jeweils Teil 1-2, ergeben sich die zur Ermittlung des Bauteilverhaltens benötigten mechanischen Kennwerten nach Gl. (2.44c)

$$X_{fi,d} = k_{\theta} \cdot X_{k,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (2.44c)$$

mit k_{θ} temperaturabhängiger Reduktionsfaktor für Festigkeit
oder E-Modul des Baustoffs
 $\gamma_{M,fi}$ Teilsicherheitsbeiwert für den entsprechenden Baustoff

Nach Eurocode 5 Teil 1-2 ergeben sich beispielsweise die zur Bestimmung der Tragfähigkeit benötigten Bemessungswerte für die Festigkeit und Steifigkeit nach Gl. (2.44d) bzw. Gl. (2.44e)

$$f_{f,d} = k_{mod,f} \cdot k_f \cdot f_k / \gamma_{M,f} \quad (2.44d)$$

$$E_{f,d} = k_{mod,f} \cdot k_f \cdot E_{k,05} / \gamma_{M,fi} \quad (2.44e)$$

Zur Bestimmung der Verformung wird der Bemessungswert der Steifigkeit nach Gl. (2.44f)

$$E_{f,d} = k_{mod,f} \cdot E_{mean} / \gamma_{M,fi} \quad (2.44e)$$

mit k_f = [1,25] für Vollholz
 k_f = [1,15] für Brettschichtholz und Sperrholz
 f_k charakteristische Festigkeit bei Normaltemperatur
 E_{mean} Mittelwert des Elastizitätsmoduls bei Normaltemperatur
 $k_{mod,f}$ Reduktionsfaktor für Festigkeit und Steifigkeit, der den Einfluß der Temperatur und Feuchtigkeit berücksichtigt. Der Reduktionsfaktor $k_{mod,f}$ ersetzt den Faktor k_{mod} aus Eurocode 5 Teil 1-1.

In den Eurocodes 2 bis 5, jeweils Teil 1-2 werden die Teilsicherheitsbeiwerte zur Ermittlung der Bemessungswerte der Baustoffe unter Brandbeanspruchung $\gamma_{M,fi}$ als "indikative" Werte angegeben (s. Abschnitt 2.1). In der Tabelle 2.5 werden die Werte der einzelnen Eurocodes vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 2.5 Übersicht über die in den Eurocodes 2 bis 5 Teil 1-2 enthaltenen Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{M,fi}$ zur Ermittlung der Bemessungswerte der Baustoffe

Eurocode	Thermischen Stoffwerte			Mechanische Stoffwerte				
Teil 1-2	Beton	Stahl	Holz	Beton	Betonstahl	Baustahl	Schub	Holz
2	[1,0]	[1,0]	-	[1,0]	[1,0]	-	-	-
3	-	[1,0]	-	-	-	[1,0]	-	-
4	[1,0]	[1,0]	-	[1,0]	[1,0]	[1,0]	[1,0]	-
5	-	-	[1,0]	-	-	-	-	[1,0]

Im Eurocode 4 Teil 1-2 wird als Bemessungswert für die Druckfestigkeit von Beton der Wert $1,0 \cdot f_{c,20^\circ C} / \gamma_{M,fi,c}$ festgesetzt; dieser Wert ist bei Anwendung der entsprechenden Nachweisverfahren mit dem temperaturabhängigen Reduktionsfaktor für Beton nach Bild 2.3 zu multiplizieren. Für das vereinfachte Nachweisverfahren von Decken nach Abschnitt 2.3.4.2 wird der Bemessungswert der Druckfestigkeit $0,85 \cdot f_{c,20^\circ C} / \gamma_{M,fi,c}$; dabei wird durch den Faktor 0,85 die Annahme eines rechteckigen Spannungsblocks in der Decke berücksichtigt.

2.4.2 Lastniveau für die brandschutztechnische Bemessung $\eta_{fi,t}$

In den Eurocodes 2 bis 5, jeweils Teil 1-2 werden für den brandschutztechnischen Nachweis drei Methoden vorgeschlagen:

- globale Tragwerksanalyse,
- Analyse von Tragwerksausschnitten und
- Analyse von Einzelbauteilen.

Die globale Tragwerksanalyse muß die maßgebende Versagensart unter Brandeinwirkung erfassen, die temperaturabhängige Veränderung der Baustoffe und der Bauteilsteifigkeit sowie die Wirkungen der thermischen Ausdehnungen und Verformungen berücksichtigen. Für diese Nachweisform sind "exakte" Nachweisverfahren geeignet.

Für die Analyse von Teilen des Tragwerks (Tragwerksausschnitte) und der Analyse von Einzelbauteilen darf der Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall $E_{fi,d,t}$ näherungsweise aus dem Bemessungswert der Einwirkungen für Normaltemperatur E_d durch Multiplikation mit dem Lastniveau η_{fi} (s. Abschnitt 2.3.1.2: Gl. (2.8)) abgeleitet werden. Das Lastniveau η_{fi} kann in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen dem Hauptwert der veränderlichen Einwirkungen zur ständigen Einwirkung nach Gl. (2.9) berechnet oder direkt aus den Eurocodes 2-5 Teil 1-2 entnommen werden. In Tabelle 2.6 werden die in den einzelnen Eurocodes enthaltenen Werte für das Lastniveau η_{fi} gegenübergestellt.

Eurocode Teil 1-2	Lastniveau η_{fi}
2	$[0,6]^{1)}$
3	Gl. (2.9)
4	$[0,6]^{2)}$
5	$[0,6]^{3)}$

Tabelle 2.6

Übersicht über die in den Eurocodes 2 bis 5 Teil 1-2 angegebenen Lastniveaus η_{fi} zur Ermittlung des Bemessungswerts der Einwirkungen im Brandfall $E_{fi,d,t}$

- 1) für die Lastkategorie D wird $\eta_{fi} = [0,7]$ empfohlen
- 2) für die Lastkategorie E wird $\eta_{fi} = [0,7]$ empfohlen
- 3) $\eta_{fi} = [0,6]$ kann für die Lastkategorie D zu unsicheren Ergebnissen führen

Für den Fall, daß eine globale Tragwerksanalyse mit einem "exakten" Nachweisverfahren durchgeführt wird, sind die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite mit $\gamma_F = 1,0$ anzusetzen.

2.5 Zusammenfassende Wertung

Für den Eurocode 1 Teil 2-2 und die Eurocodes 2 bis 5, jeweils Teil 1-2 wurden die Anwendungsbereiche für die brandschutztechnischen Nachweise mit Tabellen und Tafeln sowie die Rechengrundlagen für die vereinfachten und "exakten" Nachweisverfahren zusammengestellt. In Tabelle 2.7 sind die unterschiedlichen Nachweismethoden der "heißen" Eurocodes und ihre Anwendung für unterschiedliche Bauteile zusammenfassend dargestellt.

Die Angaben im Eurocode 1 Teil 2-2 hinsichtlich der thermischen und mechanischen Einwirkungen werden grundsätzlich in den Eurocodes 2-5 Teile 1-2 übernommen;

lediglich im Eurocode 4 Teil 1-2 wird der Emissionsgrad der Bauteiloberfläche abweichend von den Werten im Eurocode 1 Teil 2-2 spezifiziert.

Hinsichtlich der vereinfachten und "exakten" Nachweisverfahren wird in den einzelnen Eurocodes auf gleiche funktionale Beschreibungen für die Temperaturabhängigkeit der thermischen und mechanischen Baustoffkennwerte zurückgegriffen. Die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Materialseite werden einheitlich mit $\gamma_{M,fi} = [1,0]$ eingeführt.

Tabelle 2.7 Nachweismethoden der Eurocodes 2 bis 5 Teile 1-2 und ihre Anwendung für verschiedene Bauteile

Bauteile	Nachweismethoden					
	Tabellen/Tafeln		Vereinfachte Rechenverfahren		"exakte" Rechenverfahren	
Decken (Platten)	EC 2		EC 2		EC 2	
		EC 5*	EC 4	EC 5*		
Balken (Träger)	EC 2		EC 2	EC 3	EC 2	EC 3
	EC 4		EC 4	EC 5	EC 4	
Wände (Scheiben)	EC 2				EC 2	
		EC 5*		EC 5		
Stützen	EC 2		EC 2	EC 3	EC 2	EC 3
	EC 4		EC 4*	EC 5	EC 4	
Zugglieder	EC 2		EC 2	EC 3	EC 2	EC 3
				EC 5		
Teil-/Gesamtsysteme				EC 3*	EC 2*	EC 3*
		EC 5*	EC 4*		EC 4*	

* mit Einschränkungen

Auf der Einwirkungsseite wird im Fall der Analyse von Tragwerksausschnitten und von Einzelbauteilen in den Eurocodes 2, 4 und 5, jeweils Teil 1-2 der Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall vereinfachend mit Hilfe des Lastniveaus $\eta_{fi} = [0,6]$ ermittelt, Eurocode 2 und 4 Teil 1-2 erlauben gleichberechtigt die Anwendung der vereinfachten Nachweisgleichung (2.9) während Eurocode 3 Teil 1-2 dafür ausschließlich die Auswertung der vereinfachten Nachweisgleichung (2.9) vorsieht. Die Eurocodes 2, 4 und 5, jeweils Teil 1-2 berücksichtigen besonders hohe Lasteinwirkungen durch eine Erhöhung des Lastniveaus auf $\eta_{fi} = [0,7]$.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß aufgrund

- der übergreifenden Vorgabe von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Material- und Einwirkungsseite,
- der gleichen funktionalen Beschreibungen für die Temperaturabhängigkeit der thermischen und mechanischen Baustoffkennwerte sowie
- der einheitlichen Festsetzung des Lastniveaus durch Auswertung der vereinfachten Nachweisgleichung bzw. durch den Wert $\eta_{fi} = [0,6]$

die Rechengrundlagen in den Eurocodes 2-5, jeweils Teil 1-2 weitgehend gleich sind. Zu klären bleibt, ob die unterschiedlichen Rechenverfahren in den Eurocodes zu unterschiedlichen Sicherheitsniveaus führen.

3 Vergleich des erzielten Sicherheitsniveaus

3.1 Überblick

Im Hinblick auf die Sicherheitsbeurteilung eines rechnerischen Nachweisverfahrens ist vorab das mechanische Modell (Grenzzustandsgleichung) mit den Eingangsparametern zu definieren. Sofern es sich dabei um streuende Größen (Basisvariablen) handelt, sind Erwartungswerte, charakteristische Werte und Streuungen aufgrund von Literatur-, Erfahrungs- und Meßwerten anzugeben. Der Einfluß der einzelnen Parameter auf den Grenzzustand ist im Zuge von Sensitivitätsanalysen zu untersuchen und z. B. durch partielle Ableitungen o. ä. zu beschreiben.

In der anschließenden Zuverlässigkeitsanalyse ergeben sich in Abhängigkeit von den Parametereinflüssen und -streuungen sog. Wichtungsfaktoren, die ein Maß für die Auswirkungen der betreffenden Parameter auf die Zuverlässigkeit des zu bemessenden Bauteils sind. Die Zuverlässigkeit selbst wird durch den sog. Sicherheitsindex quantifiziert. Damit liegen die erwünschten rationalen Grundlagen zur Bewertung des einem Nachweisverfahren zugrundeliegenden Sicherheitskonzeptes und ggf. zur Neuermittlung von Sicherheitselementen im Hinblick auf die Gewährleistung einer baustoffunabhängig festzulegenden Mindestzuverlässigkeit vor. Die Vorgehensweise wird im folgenden für typische Nachweise (Träger und Stütze) in Stahlbeton-, Stahl-, Verbund- und Holzbauweise gemäß den Eurocodes 2, 3, 4 und 5 erläutert und angewandt.

3.1.1 Zuverlässigkeitsnachweis

Die brandschutztechnische Bemessung soll sicherstellen, daß das Versagen eines Bauteils oder Tragsystems unter den bei einem Brand in einem Brandabschnitt vorhandenen bzw. auftretenden thermischen und mechanischen Einwirkungen verhindert wird. Wegen der zufälligen Streuungen von Einflußgrößen und Ungenauigkeiten der Grenzzustandsmodelle kann ein Versagen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Wenn jedoch bei der Bemessung über die gesamte Branddauer ein ausreichender Sicherheitsabstand $Z(t)$ zwischen der aufnehmbaren Schnittkraft $M_R(t)$ (Beanspruchbarkeit) und der vorhandenen Schnittkraft $M_S(t)$ (Beanspruchung) eingehalten wird, können die Bauteile als zuverlässig gelten, weil ihre Versagenswahrscheinlichkeit hinreichend klein ist [3/1].

Aufgrund der unvermeidlichen Streuungen von Beanspruchbarkeit und Beanspruchung in Abhängigkeit der o.g. Parametereinflüsse und Modellunsicherheiten streut auch der Sicherheitsabstand zwischen Beanspruchbarkeit und Beanspruchung. Die Verteilung des Sicherheitsabstandes Z kann aus den Verteilungen der Beanspruchbarkeit und Beanspruchung berechnet werden (siehe Bild 3.1 mit R für Beanspruchbarkeit und S für Beanspruchung für Gauß'sche Normalverteilungen) [3/1], [3/2] und [3/16].

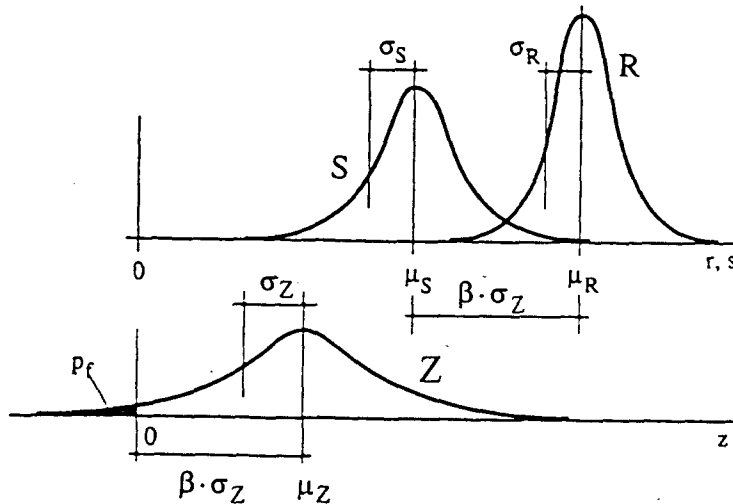


Bild 3.1 Verteilungsdichten von Beanspruchbarkeit (R), Beanspruchung (S) und Sicherheitsabstand (Z) (bei Normalverteilungen)

Die Tragfähigkeit bei Normaltemperatur wird bei den untersuchten Bauteilen im wesentlichen durch geometrische Größen wie Querschnittsabmessungen, Bauteillänge und Vorkrümmung bzw. Lastexzentrizität, bei Stahlbeton- und Verbundbauteilen Lage und Menge der Bewehrung sowie durch temperaturabhängige Baustoffkennwerte wie Festigkeit, E-Modul und σ - ϵ -Linie beeinflusst [3/1] und [3/2]. Bei der Berechnung unter Temperaturbeanspruchung müssen weitere Parameter berücksichtigt werden wie Brandraumtemperatur, Wärmeübergangsbedingungen, Feuchte von Baustoff und Bekleidung, temperaturabhängige thermische Baustoffkennwerte, Dicke der Bekleidung und bei den Holzbauteilen das Abbrandverhalten.

Je nach Bauteil (Balken, Stütze, Wand usw.) und Grenzzustandsmodell werden nur eine bestimmte Anzahl der aufgeführten Parameter beim Tragfähigkeitsnachweis wirklich berücksichtigt. Diese Parameter stellen die sog. Basisvariablen dar. Sie müssen für eine programmgesteuerte Zuverlässigkeitsanalyse des betreffenden Grenzzustandes, d. h. zur Berechnung des Sicherheitsindex β als Maß für die Zuverlässigkeit und der Wichtungsfaktoren α_i als Maß für die Streuungseinflüsse der Basisvariablen, durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden [3/15].

Nach [3/22] soll der Sicherheitsindex β bei baulichen Anlagen in Abhängigkeit von deren Größe und Bedeutung sowie möglicher Folgen eines Versagens in einem betrachteten Grenzzustand innerhalb vorgegebener Bandbreiten liegen, bei Grenzzuständen der Tragfähigkeit im allgemeinen zwischen 4,2 und 5,2 für einen Bezugszeitraum von 1 Jahr; dies entspricht der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit p_f zwischen 10^{-5} und 10^{-7} pro Jahr. Für das außergewöhnliche Ereignis Brand genügt ein reduzierter Sicherheitsindex β_{fi} , wenn sich unter Berücksichtigung der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Brandes etwa die gleiche Gesamtversagenswahrscheinlichkeit ergibt, d. h. $p_f = p_{f,fi} \cdot p_{fi}$. Der Sicherheitsindex β_{fi} läßt sich aus den Parametern der Verteilung des Sicherheitsabstandes Z mit Gl. (3.1) berechnen (zur Vereinfachung unterbleibt die Angabe der Zeitabhängigkeit (t)):

$$\beta_{fi} = \mu_Z / \sigma_Z \quad (3.1)$$

mit μ_Z Mittelwert des Sicherheitsabstandes $Z(t)$
 σ_Z Standardabweichung des Sicherheitsabstandes $Z(t)$.

Der Sicherheitsindex β_{fi} gibt an, die wievielfache Standardabweichung σ_Z als mittlerer Sicherheitsabstand zwischen Beanspruchbarkeit und Beanspruchung des Bauteils enthalten werden sollte [3/1] und [3/16].

Der Wichtungsfaktor α_i kennzeichnet den Beitrag einer Basisvariablen zur Gesamtstreuung des Sicherheitsabstandes $Z(t)$ und gibt bei einem vorgegebenen Bemessungskonzept die Empfindlichkeit des Sicherheitsindex β_{fi} gegenüber Abweichungen der jeweiligen Basisvariablen an [3/8]. Für die Basisvariablen in Bild 3.1 errechnen sich die Wichtungsfaktoren α_i beispielsweise aus Gl. (3.2a) bzw. (3.2b):

$$\alpha_{MR} = \sigma_{MR} / (\sigma_{MR}^2 + \sigma_{MS}^2)^{1/2} \quad (3.2a)$$

$$\alpha_{MS} = -\sigma_{MS} / (\sigma_{MR}^2 + \sigma_{MS}^2)^{1/2}. \quad (3.2b)$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit entspricht nach Gl. (3.3) der Wahrscheinlichkeit, daß $Z(t)$ kleiner Null wird. Mit Hilfe tabellierter Werte der Gauß-Normalverteilung (z. B. [3/16]) läßt sie sich nach Gl. (3.4) unmittelbar aus $\beta_{fi}(t)$ gemäß Gl. (3.1) bestimmen:

$$p_{f,fi} = P \{Z(t) = M_R(t) - M_S(t) \leq 0\} \quad (3.3)$$

$$p_{f,fi} = \Phi(-\beta_{fi}(t)). \quad (3.4)$$

3.2 Anwendungsbeispiele

3.2.1 Überblick

Zum Vergleich des Sicherheitsniveaus beim brandschutztechnischen Nachweis von Bauteilen aus unterschiedlichen Baustoffen werden für die Bauwerkskategorien

- Wohnhaus sowie
- Büro- und Geschäftshaus

praxisgerechte Bauteile ausgewählt, für Normaltemperatur bemessen und brandschutztechnisch nachgewiesen. In Tabelle 3.1 sind die Bauwerkskategorien und die dafür ausgewählten repräsentativen Bauteile zusammengestellt.

Dabei handelt es sich lediglich um diejenigen Bauteile, die in den folgenden Abschnitten exemplarisch zur Feststellung des vorhandenen Sicherheitsniveaus bei Anwendung der vereinfachten Rechenverfahren der jeweiligen Eurocodes herangezogen werden. Weitere brandschutztechnische Bemessungsbeispiele von Bauteilen, u. a. auch für eine Industriehalle und ein Parkhaus, sind in den Literaturstellen [3/14], [3/25], [3/26] und [3/27] enthalten und können bei Bedarf beim iBMB angefordert werden.

Tabelle 3.1 Zusammenstellung der ausgesuchten Bauteile

Bauwerke	Eurocode			
	2 - Beton	3 - Stahl	4 - Verbund	5 - Holz
Wohnhaus	Balken Stütze			Pfette Stütze
Büro- und Geschäftshaus		Träger Stütze	Deckenträger	

3.2.2 Eurocode 2 - Betonbauwerke

Für die exemplarische brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode 2 Teil 1-2 und die anschließende Sicherheitsbetrachtung wird als Beispiel ein viergeschossiges Wohnhaus aus der Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und

Städtebau zum Thema des kosten- und flächensparenden Bauens [3/28] ausgewählt. Im Bild 3.2 sind im Grundriß des Erdgeschosses die in den Abschnitten 3.3 und 3.7 genauer untersuchten Bauteile, ein Stahlbetonbalken (Unterzug) und eine -stütze eingezeichnet.

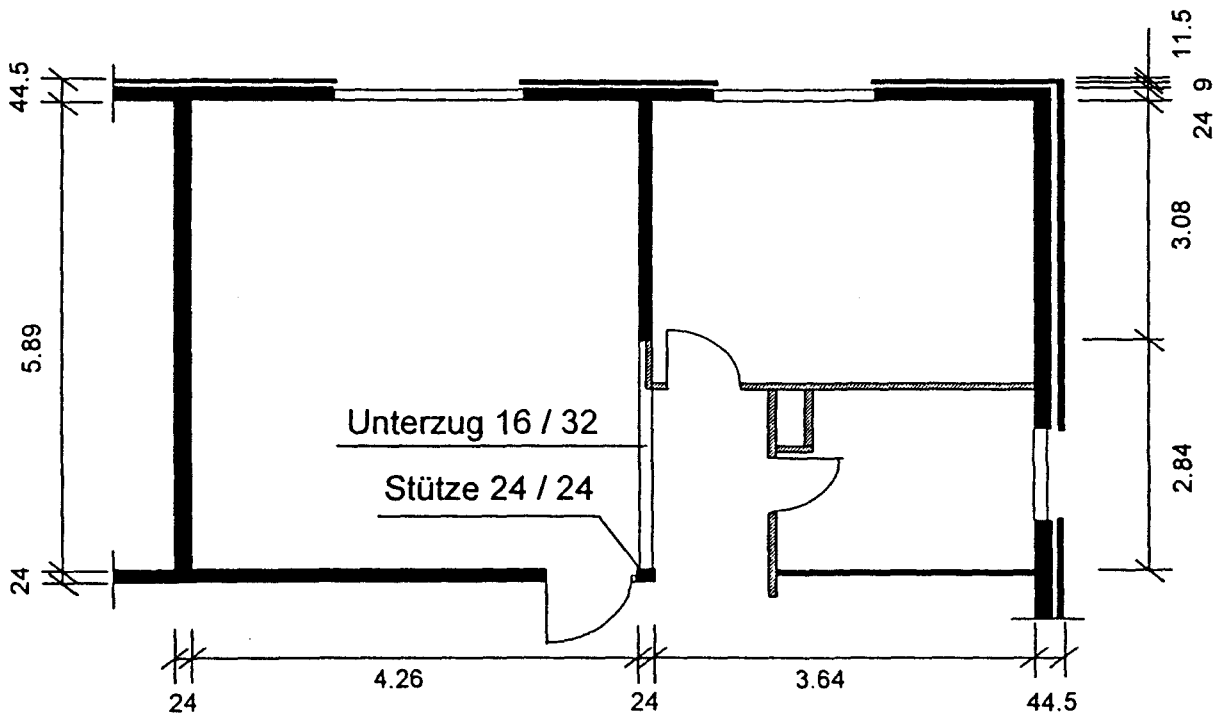


Bild 3.2 Wohnhaus: Grundriß im Erdgeschoß

3.2.3 Eurocode 3 und 4 - Stahl- und Verbundbauwerke

Für die brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode 3 und 4 - Stahl- und Verbundbauwerke - und die anschließende Sicherheitsbetrachtung werden als repräsentative Bauteile ein Träger und eine Innenstütze aus einem siebenstöckigen Büro- und Geschäftshaus ausgewählt.

Im Bild 3.3 sind in den Grundriß des Gebäudes die ausgesuchten Bauteile - als Verbundbauteile - eingezeichnet.

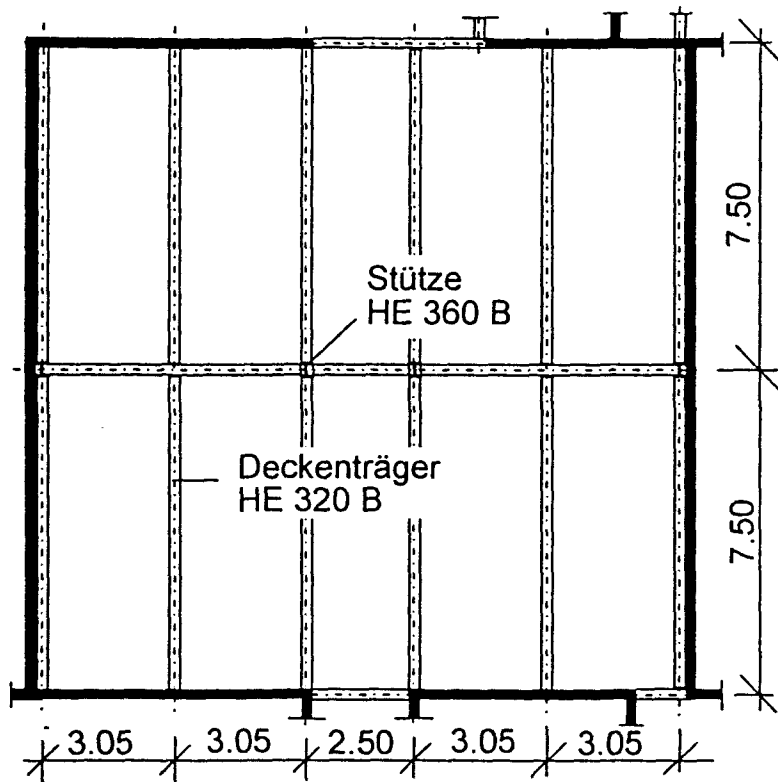


Bild 3.3 Ausschnitt aus dem Grundriß des 7stöckigen Büro- und Geschäftshauses; gekennzeichnet sind die Verbundbauteile

3.2.4 Eurocode 5 - Holzbauwerke

Für die brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode 5 - Holzbauteile und die anschließende Sicherheitsbetrachtung werden eine Pfette und eine Stütze aus einem zweistöckigen Wohnhaus ausgewählt [3/23].

Im Bild 3.4 ist der Querschnitt des Gebäudes dargestellt; die ausgesuchten Bauteile sind als Pos. 2: Pfette und als Pos. 6: Stütze gekennzeichnet.

3.3 Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 2 Teil 1-2

3.3.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren im Normteil

Das vereinfachte Nachweisverfahren im Eurocode 2 Teil 1-2 wurde bereits im Abschnitt 2.3.2.2 detailliert beschrieben.

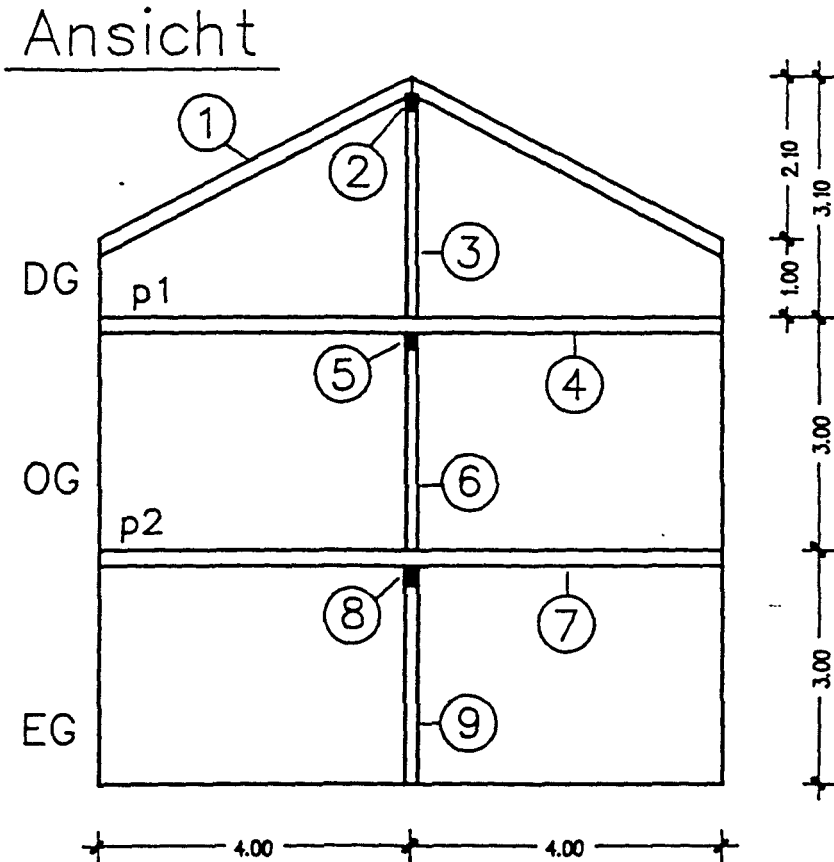


Bild 3.4 Querschnitt des 2stöckigen Wohnhauses aus [3/23]

3.3.1.1 Grenzzustandsgleichung

Die Grenzzustandsgleichung für brandbeanspruchte Biegebauteile lautet:

$$Z(t) = M_{Rd,fi}(t) - M_{Sd,fi}(t) \geq 0 \quad (3.5)$$

mit $M_{Rd,fi}(t) = f(\theta_s, \theta_{c,M}, f_{yk}(20^\circ\text{C}), f_{ck}(20^\circ\text{C}), a_z, d)^{1)}$
 Bemessungswert des aufnehmbaren Biegemoments im
 Brandfall, berechnet mit Gl. (2.14a) bis (2.20)

$$M_{Sd,fi}(t) = f(g_{fi,d}, p_{fi,d})^1)$$

Bemessungswert des aufzunehmenden Biegemoments im Brandfall nach Eurocode 1 Teil 2-2 (s. Abschnitt 2.3.1.2)

1) Es sind nur die Einflußparameter aufgeführt, die in die Grenzzustandsgleichungen der Abschnitte 3.3.1.3 und 3.3.1.4 eingehen

Für Stützen gilt Gl. (3.6):

$$Z(t) = N_{Rd,fi}(t) - N_{Sd,fi}(t) \geq 0 \quad (3.6)$$

mit $N_{Rd,fi}(t) = f(\theta_s, \theta_c, M, f_{ck}(20^\circ\text{C}), E_{sk}(20^\circ\text{C}), a_z)^{1)}$

Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft im
Brandfall, berechnet mit Gl. (2.14a) bis (2.20)

$$N_{Sd,fi}(t) = f(N_{fi,G,d}, N_{fi,P,d})^{1)}$$

Bemessungswert der aufzunehmenden Normalkraft im
Brandfall nach Eurocode 1 Teil 2-2 (s. Abschnitt 2.3.1.2).

3.3.1.2 Streuung der Einflußgrößen

Praktisch alle Einflußgrößen des vereinfachten Nachweisverfahrens sind Zufallsvariable. Dabei spielen jedoch die relativ geringen zufälligen Streuungen der Betonabmessung b und des Stahlquerschnitts A_s nur eine vernachlässigbare Rolle. Diese Einflußgrößen werden für die vorliegende Untersuchung deterministisch mit ihren Nennwerten vorgegeben [3/1]. Die temperaturabhängigen Reduktionsfaktoren für die Festigkeit des Betons $k_c(\theta)$ und des Stahls $k_s(\theta)$ sind im Abschnitt 2.3.2 als linearisierte Kurvenabschnitte formuliert (vergl. Bild 2.3 und Bild 2.2). Für die Untersuchungen mit streuenden Einflußparametern ist eine Beschreibung durch stetige Funktionsverläufe vorteilhaft, um die zugehörigen Verteilungen unabhängig von den Bereichsgrenzen der linearisierten Kurvenabschnitte ansetzen zu können. Für den Beton werden deshalb bei den folgenden Untersuchungen temperaturabhängige Reduktionsfaktoren der Festigkeit nach Gl. (3.7)

$$k_c(\theta) = 0,999375 + \theta \cdot (62,5 - 1,5625 \cdot \theta) \cdot 10^{-6} \quad (3.7)$$

und für den Stahl nach Gl. (3.8) verwendet.

$$k_s(\theta) = 0,5 \cdot (1,0 + \tanh(-0,00741 \cdot \theta + 4,0)) \quad (3.8)$$

Im Bild 3.5 sind die stetigen und linearisierten Kurvenverläufe vergleichend gegenübergestellt.

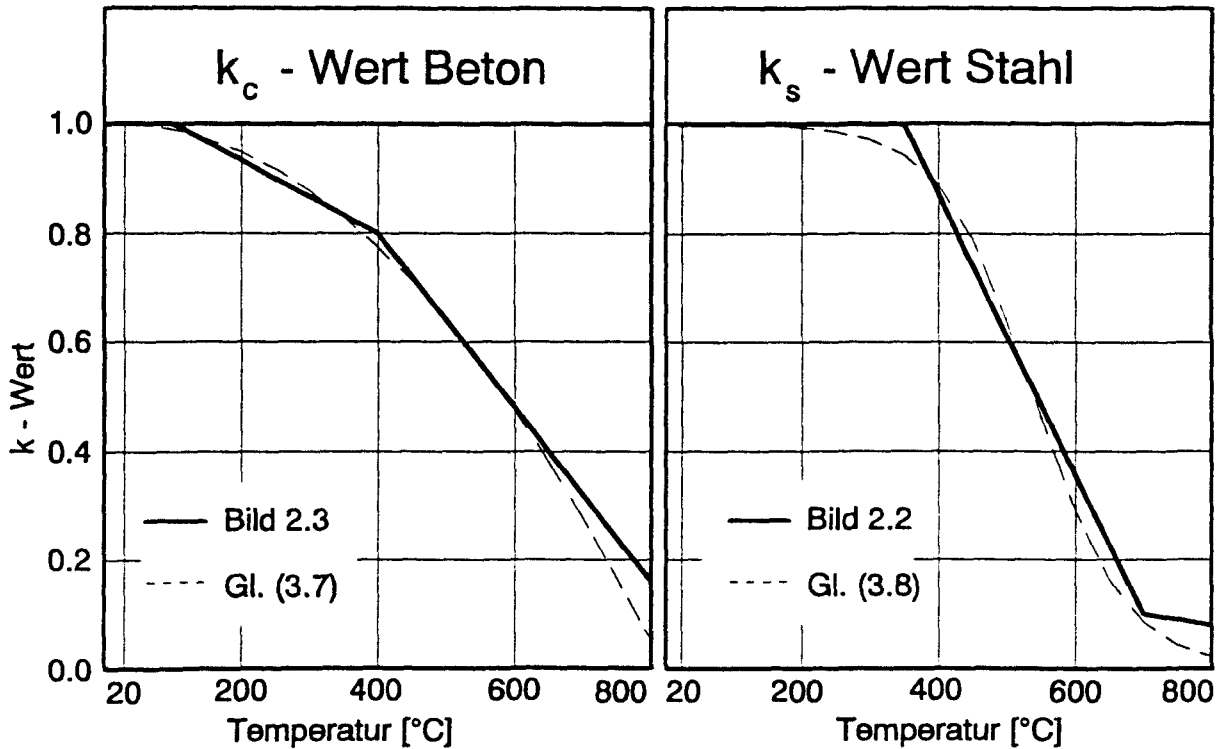


Bild 3.5 Vergleich des linearisierten und des stetigen Funktionsverlaufes für die Reduktionsfaktoren von Beton $k_c(\theta)$ und Stahl $k_s(\theta)$

In Tabelle 3.2 sind die Einflußgrößen der Grenzzustandsgleichungen mit ihren Nennwerten, Verteilungen und Variationskoeffizienten zusammengestellt. Die Angaben der Tabelle 3.1 sind aus [3/1] und [3/2] entnommen.

Tabelle 3.2 Nennwert, Verteilung und Variationskoeffizient der Einflußgrößen des vereinfachten Nachweisverfahrens im normativen Teil vom Eurocode 2 Teil 1&2

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung	Variationskoeffizient
Ständige Last $g_{fi,d}$, $G_{fi,d}$	Mittelwert	normal	0,05
Nutzlast $q_{fi,d}$, $Q_{fi,d}$	90 % Fraktile	Gumbel	0,40
Temperatur Stahl θ_s	90 % Fraktile	log. normal	0,20
Temperatur Beton $\theta_{c,M}$	90 % Fraktile	log. normal	0,20
Betonfestigkeit $f_c(20^\circ\text{C})$	5 % Fraktile	log. normal	0,15
Stahlfestigkeit $f_y(20^\circ\text{C})$	5 % Fraktile	log. normal	0,05
E- Modul Stahl $E_{sk}(20^\circ\text{C})$	Mittelwert	log. normal	0,05
zerstörte Betonzone a_z	50 % Fraktile	log. normal	0,10
Höhe d	Mittelwert	log. normal	0,15

3.3.1.3 Numerische Untersuchung eines Einfeldbalkens

Als Beispiel wird der im Bild 3.6 dargestellte Querschnitt eines Einfeldbalkens mit konstanter Streckenlast aus [3/17] berechnet. Die Brandbelastung entspricht der ETK nach DIN 4102 Teil 2 [3/18] mit einer 3seitigen Brandbeanspruchung des Balkenquerschnitts.

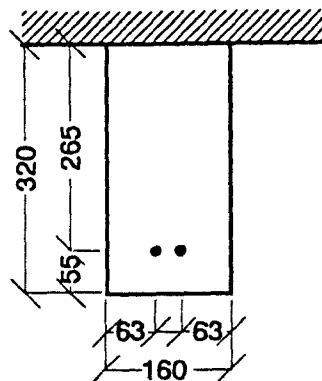


Bild 3.6 Abmessungen und Bewehrungsanordnung des Balkenquerschnitts

Der Bemessung liegen zugrunde:

Baustoffe:	Beton C35/45	$f_{ck} = 35 \text{ MN/m}^2$
		$\alpha \cdot f_{cd} = 0,85 \cdot 35 / 1,5$
		$\alpha \cdot f_{cd} = 19,8 \text{ MN/m}^2$
	Betonstahl S 500	$f_{yk} = 500 \text{ MN/m}^2$
		$f_{yd} = 500 / 1,15 = 435 \text{ MN/m}^2$
Querschnitt:	Beton	$b/h/d = 160/320/265 \text{ mm}$
	Betonstahl	erf. $A_s = 3,97 \text{ cm}^2$
		vorh. $A_s = 4,0 \text{ cm}^2 \text{ (2 - 16)}$
Schnittgrößen:	Ständige Last	$M_g = 14 \text{ kNm}$
	Nutzlast	$M_q = 14 \text{ kNm}$
Bemessungsschnittgröße:	$M_{Sd} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot M_q$	
	$M_{Sd} = 1,35 \cdot 14 + 1,50 \cdot 14 = 40 \text{ kNm.}$	

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.5) wird nach 90 Minuten Branddauer ausgewertet. Die Temperaturbeanspruchung bewirkt auf der Seite des Bauteilwiderstandes die Abnahme der Beton- und Stahlfestigkeit, ausgedrückt durch die Reduktionsfaktoren $k_c(\theta)$ und $k_s(\theta)$, sowie die Verkleinerung des Betonquerschnittes um die äußeren, dem Feuer direkt ausgesetzten Querschnittsbereiche a_z . Die Verkleinerung des Betonquerschnittes a_z wird mit Hilfe der im Anhang vom Eurocode 2 Teil 1-2 bereitgestellten Kurve, der für vorgegebene Branddauern ausgewerteten und grafisch dargestellten Gl. (2.15), bestimmt.

Für die Betonfestigkeit wird der Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Dauerstandsfestigkeit angesichts des nur kurzzeitig anstehenden Lastfalls Brand zu $\alpha = 1.0$ gesetzt, d. h., es wird unmittelbar mit der Zylinderdruckfestigkeit gerechnet.

Für die Bewehrungsstäbe und für die Betondruckzone wird mit Hilfe einer Nebenrechnung eine mittlere Temperatur bestimmt und dafür der entsprechende $k_s(\theta)$ - Wert für Stahl aus Bild 2.2 und der $k_c(\theta)$ - Wert für Beton aus Bild 2.3 entnommen.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $M_{Sd,fi}$ kann unterschiedlich ermittelt werden. Im einen Fall wird er vereinfachend aus dem Bemessungs-

wert M_{Sd} der Bemessung für Normaltemperatur durch Multiplikation mit einem Reduktionsfaktor η_{fi} bestimmt. Der Reduktionsfaktor berücksichtigt die Abminderung der Teilsicherheitsbeiwerte γ_g und γ_q für den außergewöhnlichen Lastfall Brand auf jeweils 1,0 sowie die zusätzliche Abminderung des Nutzlastanteils (M_q) der Beanspruchung mit dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1}$. Der Reduktionsfaktor kann aus Bild 2.1 des Eurocode 2 Teil 1-2 abhängig von der Art und dem Anteil der Verkehrslast abgelesen oder näherungsweise mit $\eta_{fi} = 0,6$ angenommen werden. Alternativ kann der Bemessungswert $M_{Sd,fi}$ für den Brandfall direkt durch Kombination der mit den vorgenannten Teilsicherheitsbeiwerten und beim Verkehrslastanteil zusätzlich mit dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1}$ multiplizierten Einwirkungsanteile bestimmt werden. Dieser allgemeingültigere Weg wird hier beschritten. Der Kombinationsbeiwert wird mit $\psi_{1,1} = 0,5$ (für Nutzlasten der Kategorie A und B nach Eurocode 1) angenommen.

Der rechnerische Nachweis nach Abschnitt 2.3.2.2, Gl. (2.14a) bis (2.20) ergibt, daß nach 90 Minuten Branddauer beim untersuchten Querschnitt noch Tragreserven vorhanden sind.

$$\begin{aligned} Z(t=90') &= M_{Rd,fi}(t=90') - M_{Sd,fi}(t=90') \\ &= 28 - 21 = 7 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Das Ergebnis wird durch die Angaben in den Bemessungstabellen des Eurocode 2 Teil 1-2 bzw. der DIN 4102 Teil 4 [3/19] bestätigt. In Tabelle 3 von [3/19] wird z. B. als Mindestbreite von maximal 3seitig beflamten, statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonbalken $b = 150 \text{ mm}$ für die Feuerwiderstandsklasse F 90 verlangt, so daß die vorhandene Balkenbreite von 160 mm auf der sicheren Seite liegt.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird nach 60, 75 und 90 Minuten Branddauer geführt.

Die Basisvariablen für die programmgesteuerte Berechnung der Wichtungsfaktoren α_i , des Sicherheitsindex β_{fi} und der Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ sind mit ihren Verteilungsannahmen in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

Tabelle 3.3 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis eines Stahlbetonbalkens

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
M_g	Mittelwert 14 kNm	N	14 kNm	0,7 kNm
M_q	90 % Fraktile 14 kNm	GU	9,2 kNm	3,7 kNm
$\theta_{c,M}$	90 % Fraktile	LN		
	t = 60 min.: 100 °C		78,9 °C	15,8 °C
	t = 75 min.: 160 °C		126,3 °C	25,3 °C
	t = 90 min.: 210 °C		165,8 °C	33,2 °C
a_z	50 % Fraktile	LN		
	t = 60 min: 16,5 mm		16,6 mm	1,66 mm
	t = 75 min: 19 mm		19,1 mm	1,91 mm
	t = 90 min: 22 mm		22,1 mm	2,21 mm
θ_s	90 % Fraktile	LN		
	t = 60 min: 332 °C		262,1 °C	52,4 °C
	t = 75 min: 425 °C		335,5 °C	67,1 °C
	t = 90 min: 520 °C		410,5 °C	82,1 °C
f_{ck}	5 % Fraktile 35 MN/m ²	LN	45,3 MN/m ²	6,8 MN/m ²
f_{yk}	5 % Fraktile 500 MN/m ²	LN	543,5 MN/m ²	27,2 MN/m ²
Höhe d	Mittelwert 0,265 m	LN	0,265 m	0,04 m

1) N = Normalverteilung;

GU = Gumbel, Extremwert I Verteilung;

LN = Logarithmische Normalverteilung

Die mit dem Computerprogramm "Comrel" berechneten Ergebnisse des Nachweises mit streuenden Einflußparametern sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt. Wie erwartet, ändert sich der Sicherheitsindex β_{fi} im Verlauf des Brandgeschehens. Er wird mit steigenden Bauteiltemperaturen θ_s und $\theta_{c,M}$ kleiner und entsprechend größer wird die Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$. Anhand der unterschiedlichen Wichtungsfaktoren α_i lassen sich eindeutig dominierende und untergeordnete Einflußgrößen des Zuverlässigkeitsnachweises unterscheiden. Die Wichtigkeit der Einflußgrößen verändert sich mit fortschreitender Branddauer.

Zu den Einflußgrößen, deren Streuungen einen nennenswerten Einfluß auf den Zuverlässigkeitsnachweis haben, gehören (nach 90 Minuten Branddauer):

- Nutzlast	$\alpha_{Mq,90'}$	= -0,0871
- Stahltemperatur	$\alpha_{\theta s,90'}$	= -0,9843
- Querschnittshöhe	$\alpha_{d,90'}$	= 0,1425
$\sum \alpha_i^2$		= 0,9967 \approx 1

Die anderen Einflußgrößen spielen im Zuverlässigkeitsnachweis eine untergeordnete Rolle; sie können beim Nachweis mit ihren Nennwerten, ohne spezielle Sicherheitselemente, eingesetzt werden.

Aus den Vorzeichen der Wichtungsfaktoren α_i wird die Auswirkung der entsprechenden Parameter auf die Zuverlässigkeit deutlich. Eine Vergrößerung des betreffenden Parameters bewirkt bei negativem Vorzeichen eine Verringerung und bei positivem Vorzeichen eine Vergrößerung des vorhandenen Sicherheitsindex β_{fi} .

Tabelle 3.4 Sicherheitsindex β_{fi} , Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und Wichtungsfaktoren α_i für den vereinfachten Nachweis eines Stahlbetonbalkens (Eurocode 2 Teil 1-2, Nachweis im normativen Teil)

	Branddauer [min]		
	60	75	90
β_{fi}	4,734	2,885	1,880
$p_{f,fi}$	$1,1005 \cdot 10^{-6}$	$1,9600 \cdot 10^{-3}$	$3,0028 \cdot 10^{-2}$
α_{Mg}	-0,0951	-0,0351	-0,0346
α_{Mq}	-0,7037	-0,0916	-0,0871
$\alpha_{\theta c}$	-0,0015	-0,0002	-0,0004
α_{az}	-0,0140	-0,0009	-0,0011
$\alpha_{\theta s}$	-0,0481	-0,9833	-0,9843
α_{fck}	0,0796	0,0043	0,0043
α_{fyk}	0,1720	0,0458	0,0446
α_d	0,6763	0,1462	0,1425

3.3.1.4 Numerische Untersuchung einer Stütze

Als Beispiel wird eine Stütze mit dem in Bild 3.7 dargestellten Querschnitt berechnet [3/17]; es handelt sich um eine gedrungene Stütze ohne Knickgefahr. Sie wird entsprechend der ETK nach DIN 4102 Teil 2 [3/18] 4seitig brandbeansprucht.

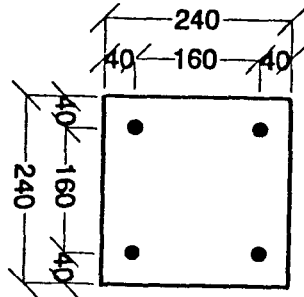


Bild 3.7 Mittig belasteter Stützenquerschnitt

Der Bemessung liegen zugrunde:

Baustoffe:	Beton C35/45	$f_{ck} = 35 \text{ MN/m}^2$ $f_{cd} = 35/1,5 = 23,3 \text{ MN/m}^2$
	Betonstahl S 500	$f_{yk} = 500 \text{ MN/m}^2$ $f_{yd} = 500/1,15 = 435 \text{ MN/m}^2$ $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MN/m}^2$ $\sigma_{sd} = E_s \cdot \epsilon_{su} = 2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}$ $\sigma_{sd} = 400 \text{ MN/m}^2$
Querschnitt:	Beton	$b/h = 240/240 \text{ mm}$ vorh. $u = 40 \text{ mm}$
	Betonstahl	$A_s = 4 \cdot 3,14 \text{ cm}^2 (4 \phi 20)$
Schnittgrößen:	Ständige Last	$N_g = 825 \text{ kN}$
	Nutzlast	$N_q = 350 \text{ kN}$
Bemessungsschnittgrößen:		$N_{Sd} = \gamma_g \cdot N_g + \gamma_q \cdot N_q$ $N_{Sd} = 1,35 \cdot 825 + 1,50 \cdot 350 = 1639 \text{ kN}$
Bemessungswert der Tragfähigkeit:		$N_{Rd} = A_b \cdot \alpha \cdot f_{cd} + \Sigma A_s \cdot \sigma_{sd}$ $N_{Rd} = (24^2 \cdot 0,85 \cdot 23,3 + 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 400) \cdot 10^3$ $N_{Rd} = 1644 \text{ kN}$

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.6) wird nach 90 Minuten Branddauer ausgewertet. Die Ermittlung der Bemessungsschnittgröße im Brandfall $N_{Sd,fi}$ erfolgt in diesem Fall mit Gl. (2.9):

$$\begin{aligned}
 \eta_{fi} &= (\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi) / (\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi) = 0,61 \\
 \text{mit } \gamma_{GA} &= 1,0 \\
 \psi_{1,1} &= 0,5 \\
 \xi &= 350/825 = 0,424 \\
 \gamma_G &= 1,35 \\
 \gamma_Q &= 1,5 \\
 N_{Sd,fi} &= \eta_{fi} \cdot N_{Sd} \\
 N_{Sd,fi} &= 0,61 \cdot 1639 = 1000 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Die weiteren Rechenannahmen entsprechen denen des Nachweises des Stahlbetonbalkens mit deterministischen Einflußgrößen (Abschnitt 3.3.1.3).

Der rechnerische Nachweis nach Abschnitt 2.3.2.2, Gl. (2.14a) bis (2.20) ergibt

$$\begin{aligned}
 Z(t=90') &= N_{Rd,fi}(t=90') - N_{Sd,fi}(t=90') \\
 &= 1077 - 1000 = 77 \text{ kN.}
 \end{aligned}$$

Die zentrische Tragfähigkeit ist also nach 90 Minuten Branddauer nahezu erschöpft. Das Ergebnis wird durch DIN 4102 Teil 4 [3/19] bestätigt: in Tabelle 31 werden als Mindestdicke $d = 240 \text{ mm}$ und für Bewehrungsstäbe $\phi = 20 \text{ mm}$ als Mindestachsabstand $u = \text{nom } c + \phi/2 = 30 + 20/2 = 40 \text{ mm}$ gefordert. Beide Mindestwerte entsprechen den vorhandenen Werten im Beispiel. Die Angaben in Tabelle 31 sind auf den Ausnutzungsfaktor $\alpha_1 = 1,0$ bezogen, wobei α_1 das Verhältnis der vorhandenen Beanspruchung zu der zulässigen Beanspruchung ($1/\gamma$ -fache rechnerische Bruchlast) nach DIN 1045 ist. Im vorliegenden Beispiel bedeutet das mit den der Bemessung zugrunde gelegten Zahlenwerten:

$$\begin{aligned}
 N_{zul} &= \{(24^2 \cdot 27 + 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 420) \cdot 10^3\} / 2,1 \\
 N_{zul} &= 2083 / 2,1 = 992 \text{ kN} \approx N_{Sd,fi}.
 \end{aligned}$$

Danach ist auch unter der zulässigen Belastung nach DIN 1045 die Tragfähigkeit nach 90 Minuten Branddauer nahezu erschöpft.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Alle Rechenannahmen für den Nachweis des Stahlbetonbalkens mit streuenden Einflußgrößen (Abschnitt 3.3.1.3) gelten unverändert.

In Tabelle 3.5 sind die Eingangsgrößen für die Berechnung zusammengestellt.

Tabelle 3.5 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis einer Stahlbetonstütze

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
N_g	Mittelwert 825 kN	N	825 kN	41,3 kN
N_q	90 % Fraktile 350 kN	GU	230,0 kN	92,0 kN
$\theta_{c,M}$	90 % Fraktile	LN		
	t = 60 min.: 102 °C		80,5 °C	16,1 °C
	t = 75 min.: 125 °C		98,7 °C	19,7 °C
	t = 90 min.: 183 °C		144,4 °C	28,9 °C
a_z	50 % Fraktile	LN		
	t = 60 min: 25 mm		25,1 mm	2,51 mm
	t = 75 min: 30 mm		30,2 mm	3,02 mm
	t = 90 min: 35 mm		35,2 mm	3,52 mm
θ_s	90 % Fraktile	LN		
	t = 60 min: 495 °C		390,8 °C	78,2 °C
	t = 75 min: 575 °C		453,9 °C	90,8 °C
	t = 90 min: 640 °C		505,3 °C	101,1 °C
f_{ck}	5 % Fraktile 35 MN/m ²	LN	45,3 MN/m ²	6,8 MN/m ²
E_{sk} MN/m ²	Mittelwert 200000 MN/m ²	LN	$2 \cdot 10^5$ MN/m ²	10^4

¹⁾ siehe Tabelle 3.3

Die Ergebnisse für den Nachweises mit streuenden Einflußparametern sind in Tabelle 3.6 zusammengestellt.

Tabelle 3.6 Sicherheitsindex β_{fi} , Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und Wichtungsfaktoren α_i für den vereinfachten Nachweis einer Stahlbetonstütze (Eurocode 2 Teil 1-2, Nachweis im normativen Teil)

	Branddauer [min]		
	60	75	90
β_{fi}	4,495	3,467	2,513
$p_{f,fi}$	$3,4786 \cdot 10^{-6}$	$2,6344 \cdot 10^{-4}$	$5,9867 \cdot 10^{-3}$
α_{Ng}	-0,1887	-0,1954	-0,1947
α_{Nq}	-0,3234	-0,2789	-0,2431
$\alpha_{\theta c}$	-0,0131	-0,0212	-0,0493
α_{az}	-0,2702	-0,3473	-0,4076
$\alpha_{\theta s}$	-0,5939	-0,5714	-0,5715
α_{fc}	0,6585	0,6604	0,6384
α_{Es}	0,0186	0,0173	0,0173

Zu den Einflußgrößen, deren Streuungen eine nennenswerten Einfluß auf den Zuverlässigkeitsnachweis haben, gehören:

- Ständige Last	$\alpha_{Ng,90'}$	= -0,1947
- Nutzlast	$\alpha_{Nq,90'}$	= -0,2431
- zerstörte Betonzone	$\alpha_{az,90'}$	= -0,4076
- Stahltemperatur	$\alpha_{ps,90'}$	= -0,5715
- Betonfestigkeit	$\alpha_{fc,90'}$	= 0,6384
$\Sigma \alpha_i^2$		= 0,9973 \approx 1

Die übrigen Einflußgrößen spielen eine untergeordnete Rolle, so daß sie beim Nachweis mit ihren Nennwerten eingesetzt werden können.

3.3.2 Vereinfachtes Nachweisverfahren im Anhang

Das vereinfachte Nachweisverfahren im Anhang des Eurocodes 2 Teil 1-2 wurde im Abschnitt 2.3.2.2 detailliert beschrieben.

3.3.2.1 Grenzzustandsgleichung

Die Grenzzustandsgleichung für Einfeldbalken Gl. (3.9) wird mit Hilfe von Gl. (2.21) und (2.22) bestimmt:

$$Z(t) = \gamma_s / \gamma_{s,fi} \cdot k_s(\theta_s) \cdot M_{Sd} \cdot A_{s,prov} / A_{s,req} - M_{Sd,fi} \quad (3.9)$$

mit	γ_s	Teilsicherheitsfaktor der Bewehrung nach ENV 1992-1-1 (i.a.: 1,15)
	$\gamma_{s,fi}$	Teilsicherheitsfaktor der Bewehrung bei Brandbeanspruchung (i.a.: 1,00)
	$k_s(\theta_s)$	Reduktionsfaktor für die Festigkeit der Bewehrung nach Gl. (3.8)
	M_{Sd}	Bemessungsmoment der Einwirkungen für Normaltemperatur nach ENV 1992-1-1
	$A_{s,prov}$	vorhandene Fläche der Bewehrung
	$A_{s,req}$	erforderliche Fläche der Bewehrung im Grenzzustand der Tragfähigkeit; dabei muß eingehalten werden: $A_{s,prov} / A_{s,req} \leq 1,3$
	$M_{Sd,fi}$	Bemessungswert des aufzunehmenden Biegemoments im Brandfall nach Eurocode 1 Teil 2-2 (s. Abschnitt 2.3.1.2).

3.3.2.2 Streuung der Einflußgrößen

Für die streuenden Einflußgrößen in Gl. (3.9) ($k_s(\theta_s)$, $M_{Sd}(M_g, M_q)$) werden die in Tabelle 3.2 aufgeführten Nennwerte, Verteilungen und Variationskoeffizienten übernommen.

3.3.2.3 Numerische Untersuchung eines Einfeldbalkens

Die numerische Untersuchung wird für das Beispiel vom Abschnitt 3.3.1.3 durchgeführt.

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Der rechnerische Nachweis nach Abschnitt 2.3.2.2, Gl. (2.22) ergibt, daß der untersuchte Querschnitt nach 90 Minuten Branddauer noch tragfähig ist:

$$\begin{aligned} Z(t=90') &= M_{Rd,fi}(t=90') - M_{Sd,fi}(t=90') \\ &= 26 - 21 = 5 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Für den Nachweis mit streuenden Einflußgrößen werden die Rechenannahmen aus Tabelle 3.3 übernommen.

Die Ergebnisse des Nachweises mit streuenden Einflußparametern sind in Tabelle 3.7 zusammengestellt.

Tabelle 3.7 Sicherheitsindex β_{fi} , Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und Wichtungsfaktoren α_i für den vereinfachten Nachweis eines Stahlbetonbalkens (Eurocode 2 Teil 1-2, Nachweis im Anhang)

	Branddauer [min]		
	60	75	90
β_{fi}	3,708	2,464	1,447
$p_{f,fi}$	$1,0459 \cdot 10^{-4}$	$6,8746 \cdot 10^{-3}$	$7,4008 \cdot 10^{-2}$
α_{Mg}	-0,0104	-0,0105	-0,0106
α_{Mq}	0,0809	0,0811	0,0812
$\alpha_{\theta s}$	-0,9967	-0,9967	-0,9966

Zu den dominierenden Einflußgrößen gehören:

- Nutzlast	$\alpha_{Mq,90^\circ}$	= 0,0812
- Stahltemperatur	$\alpha_{\theta s,90^\circ}$	= -0,9966
<hr/>		
	$\sum \alpha_i^2$	= 0,9998 \approx 1

Die übrigen Einflußgrößen spielen im Zuverlässigkeitsnachweis eine untergeordnete Rolle; sie werden beim Nachweis mit ihren Nennwerten eingesetzt.

3.4 Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 3 Teil 1-2

3.4.1 Krit. T - Verfahren

Beim vereinfachten Nachweisverfahren mit Hilfe der kritischen Temperatur werden, wie im Abschnitt 2.3.3.2 detailliert beschrieben, zwei Temperaturwerte verglichen: auf der Widerstandsseite die belastungsabhängige kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$ und auf der Einwirkungsseite die zum betrachteten Zeitpunkt im Stahlprofil vorhandene Temperatur θ_a .

3.4.1.1 Grenzzustandsgleichung

Die Grenzzustandsgleichung (3.10) wird mit Hilfe der Gl. (2.24) und (2.36) bestimmt:

$$Z(t + \Delta t) = \theta_{a,cr} - (\theta_{a,t} + \Delta\theta_{a,t}) \quad (3.10)$$

mit $\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln[1/(0,9674 \cdot \mu_o^{3,833}) - 1] + 482$

$$\mu_o = E_{fi,d}/R_{fi,d,0}$$

$$\Delta\theta_{a,t} = (\lambda_p/d_p)/(c_a \cdot \rho_a) \cdot A_p/V \cdot [1/(1+\phi/3)] \cdot (\theta_t - \theta_{a,t}) \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_t$$

wobei $\phi = (c_p \cdot \rho_p)/(c_a \cdot \rho_a) \cdot d_p \cdot A_p/V$

$\theta_{a,t}$ Stahltemperatur zur Zeit t

mit A_p Oberfläche der Bekleidung je m [m²/m]
 V Volumen des Stahlprofils je m [m³/m]
 c_a spez. Wärmekapazität des Stahls [J/kgK]
 c_p spez. Wärmekapaz. der Bekleidung [J/kgK]

d_p	Dicke der Bekleidung [m]
Δt	Zeitintervall ≤ 30 Sekunden
θ_t	Heißgastemperatur zur Zeit t
$\Delta\theta_t$	Anstieg der Heißgastemperatur während t
λ_p	Wärmeleitfähigkeit der Bekleidung [W/mK]
ρ_a	Dichte des Baustahls [kg/m ³]
ρ_p	Dichte der Bekleidung [kg/m ³].

Die Stahltemperatur θ_a wird rekursiv durch Berechnung der Temperaturerhöhung $\Delta\theta_a$ im Zeitintervall Δt ermittelt, wobei $\Delta t \leq 30$ s sein soll. Zur befriedigenden Wiedergabe der bei Brandversuchen gemessenen Stahltemperaturen wird im allgemeinen mit $\Delta t \approx 1$ s gerechnet; im vorliegenden Fall würde dadurch aber der Rechenaufwand zur Auswertung der Grenzzustandsgleichung unverhältnismäßig groß. Es wird deshalb eine Näherungslösung benutzt, die die Stahltemperatur als Potenzreihe nach Gl. (3.11) berechnet.

$$\theta_{a,t} = \theta_{a,0} + \sum (-1)^{i+1} \cdot (\xi \cdot t_n/n)^i \cdot A_i \quad (3.11)$$

mit $\theta_{a,0}$ Stahltemperatur zur Zeit $t = 0$ min [°C]

t_n Branddauer [min]

n Anzahl der Zeitintervalle

i Laufvariable $1 \leq i \leq n$

ξ Materialkennwert für Stahl und Bekleidung

$$= (\lambda_p/d_p)/(c_a \cdot \rho_a) \cdot A_p/V \cdot [1/(1+\phi/3)]$$

$$\text{wobei } \phi = (c_p \cdot \rho_p)/(c_a \cdot \rho_a) \cdot d_p \cdot A_p/V$$

Für die Bedeutung der Bezeichnungen siehe Erklärungen zu Gl. (3.10)

$$A_i = \sum \beta_{j,i} \cdot \alpha_{k-j}$$

mit $\beta_{j,i}$ Binominalkoeffizienten für $0 \leq j \leq n-1$

α_{k-j} Summe der Heißgastemperaturen

$$\sum \theta_t' = \sum 345 \cdot \log(8 \cdot t_{k-j} + 1)$$

mit $k = n + 1$.

Tabelle 3.8 zeigt den Vergleich von Stahltemperaturen nach 90 Minuten Branddauer, die mit Hilfe des "genauen" Ansatzes nach Gl. (2.36) bzw. mit der Näherung nach Gl. (3.11) berechnet wurden. Den Berechnungen liegen die in Tabelle 3.8 zusammengestellten Materialwerte für Stahl und Bekleidung aus [3/21] zugrunde. In einer Nebenrechnung wurde festgestellt, daß durch eine Veränderung der Materialwerte in Tabelle 3.9 die Stahltemperaturen nach Gl. (2.36) und Gl. (3.11) in annähernd gleicher prozentualer Größe beeinflusst werden.

Tabelle 3.8 Vergleich von Stahltemperaturen $\theta_{a,90}$ nach Gl. (2.36) und Gl. (3.11)

Berechnung nach	$\theta_{a,90}$ $A_p/V = 58 \text{ l/m}$ $d_p = 0,012 \text{ m}$	Verhältnis $\theta_{a,(3.11)} / \theta_{a,(2.36)}$	$\theta_{a,90}$ $A_p/V = 73 \text{ l/m}$ $d_p = 0,020 \text{ m}$	Verhältnis $\theta_{a,(3.11)} / \theta_{a,(2.36)}$
Gl. (2.36)	587	-	488	-
Gl. (3.9)				
mit $n = 4$	673	1,15	542	1,11
mit $n = 6$	646	1,10	522	1,07
mit $n = 9$	628	1,07	509	1,04

Tabelle 3.9 Materialwerte von Stahl und Bekleidung

	Stahl	Bekleidung
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	-	$\lambda_p = 0,20$
Dichte [kg/m ³]	$\rho_a = 7850$	$\rho_p = 1200$
spez. Wärmekapazität [J/kgK]	$c_a = 600$	$c_p = 800$

Die Berechnung der Stahltemperatur mit der Näherungslösung Gl. (3.11) ergibt Abweichungen zwischen 15 % und 4 % gegenüber der genauen Lösung mit Gl. (2.36), je nach Anzahl n der gewählten Zeitintervalle. Bei Auswertung der Grenzzustandsgleichung mit Hilfe der Näherungslösung Gl. (3.11) wird deshalb mit einer im Verhältnis $\theta_{a,(3.11)}/\theta_{a,(2.36)}$ (s. Tabelle 3.8) modifizierten kritischen Temperatur Gl. (3.12) gerechnet.

$$\theta_{a,cr,mod} = \theta_{a,cr}(Gl.(2.24)) \cdot \theta_{a,(3.11)}/\theta_{a,(2.36)} \quad (3.12)$$

Mit Hilfe von Gl. (3.11) und Gl. (3.12) wird die Grenzzustandsgleichung (3.13) formuliert und für die Nachweise mit streuenden Einflußparametern ausgewertet (Abschnitte 3.4.1.3 und 3.4.1.4).

$$Z(t) = \theta_{a,cr,mod} - (\theta_{a,0} + \sum (-1)^{i+1} \cdot (\xi \cdot t_n/n)^i \cdot A_i) \quad (3.13)$$

3.4.1.2 Streuung der Einflußgrößen

Wie zuvor bei den vereinfachten Nachweisverfahren des Eurocodes 2 im Abschnitt 3.3.1.2 wird auch beim vereinfachten Nachweisverfahren des Eurocodes 3 zwischen streuenden Einflußgrößen unterschieden, die auf den Zuverlässigkeitsnachweis von Einfluß sind und solchen, die nur einen geringen Streuungseinfluß haben. Zur zweiten Gruppe gehören die geometrischen Größen des Stahlprofils (Volumen V , plastisches Widerstandsmoment), Oberfläche der Bekleidung A_p (Streuungen hinsichtlich der Abmessungen der Bekleidung werden durch die Bekleidungsdicke d_p berücksichtigt), die Branddauer t_n und die Heißgastemperatur $\theta_{t=0}$; außerdem wurde in einer Nebenrechnung festgestellt, daß eine Variation der thermischen Materialwerte der Bekleidung c_p und ρ_p nur sehr geringen Einfluß auf die Stahltemperatur ausübt.

Die letztgenannten Einflußgrößen werden in der Grenzzustandsgleichung deterministisch mit ihrem Nennwert vorgegeben. Die anderen Einflußgrößen werden als Basisvariable in der Grenzzustandsgleichung berücksichtigt, wobei die Stahltemperatur nach Gl. (3.11) für $n = 4$ ermittelt wird. Für den Stahl werden die thermischen Materialwerte für die spezifische Wärmekapazität c_a und für die Dichte ρ_a zum Materialkennwert $a_a' = c_a \cdot \rho_a$ zusammengefaßt. In Tabelle 3.10 sind die Einflußgrößen mit ihren Nennwerten, Verteilungen und Variationskoeffizienten zusammengestellt.

Tabelle 3.10 Nennwert, Verteilung und Variationskoeffizient der Einflußgrößen des vereinfachten Nachweisverfahrens mit Hilfe der kritischen Temperatur vom Eurocode 3 Teil 1-2

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung	Variationskoeffizient
ständige Last $g_{fi,d}$, $G_{fi,d}$	Mittelwert	normal	0,05
Nutzlast $p_{fi,d}$, $P_{fi,d}$	90 % Fraktile	Gumbel	0,40
Stahlfestigkeit $f_{yk}(20^\circ\text{C})$	5 % Fraktile	log. normal	0,05
therm. Wert Stahl $a_a' = c_a \cdot \rho_a$	5 % Fraktile	log. normal	0,10
Wärmeleitfähigkeit Bekl. λ_p	Mittelwert	log. normal	0,15
Dicke Bekleidung d_p	Mittelwert	log. normal	0,10
Rechenwert der Heißgastemperatur A_i	90 % Fraktile	log. normal	0,20

3.4.1.3 Numerische Untersuchung eines Einfeldträgers

Als Beispiel wird der im Bild 3.8 dargestellte Querschnitt eines Einfeldträgers mit konstanter Streckenlast aus [3/17] berechnet.

Der Träger wird entsprechend der ETK nach DIN 4102 Teil 2 [3/18] 3seitig brandbeansprucht und zum Schutz vor zu schneller Erwärmung kastenförmig mit Vermiculiteplatten bekleidet. Die brandschutztechnische Bemessung erfolgt für 90 Minuten Branddauer. Nach [3/20], Tafel 15 ist dafür eine Plattendicke von 12 mm erforderlich.

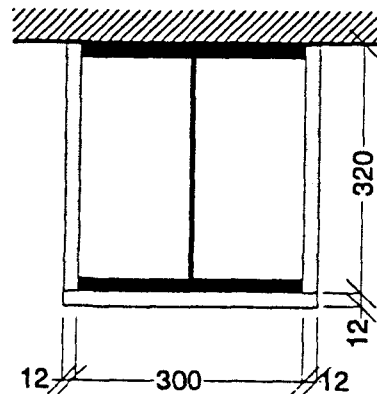


Bild 3.8 Querschnitt des Stahlträgers

Der Bemessung liegen zugrunde:

Baustoff:	Stahl S 235	$f_{yk} = 235 \text{ MN/m}^2$
		$f_{yd} = 235/1,1 = 214 \text{ MN/m}^2$
Querschnitt:	Bekleidung	Vermiculite Platten (kastenförmig)
	Stahl	HE 320 B
		$A = 161 \text{ cm}^2$
		$W_{pl} = 2140 \text{ cm}^3$
Schnittgrößen:		$U/A = 58 \text{ m}^{-1}$
	Bekleidung	vorh. d = 12 mm
	Ständige Last	$M_g = 157,5 \text{ kNm}$
	Nutzlast	$M_q = 157,5 \text{ kNm}$
Bemessungsschnittgröße:	$M_{Sd} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot M_q$	
	$M_{Sd} = 1,35 \cdot 157,5 + 1,50 \cdot 157,5 = 450 \text{ kNm}$	

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.10) wird nach 90 Minuten Branddauer ausgewertet.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $M_{fi,Ed}$ wird aus der entsprechenden Schnittgröße bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_g = \gamma_q = 1,0$ und dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1} = 0,5$ berechnet:

$$\begin{aligned} M_{fi,Ed} &= \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot \psi_{1,1} \cdot M_q \\ &= 1,0 \cdot 157,5 + 1,0 \cdot 0,5 \cdot 157,5 = 236,3 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes $R_{fi,d,0}$ wird nach Gl. (2.29) zu

$$\begin{aligned} M_{fi,0,Rd} &= k_{y,0} \cdot M_{Rd} \\ \text{mit } k_{y,0}(t=0) &= 1,0 \\ M_{Rd}(\gamma_M=1,0) &= W_{pl} \cdot f_{yk} = 2140 \cdot 235 \cdot 10^{-3} = 503 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Für den Ausnutzungsfaktor μ_0 nach Gl. (2.25)

$$\mu_0 = 236,3 / 503 = 0,47$$

wird nach Gl. (2.24) die kritischen Temperatur $\theta_{a,cr} = 595 \text{ °C}$.

Zur Berechnung der Stahltemperatur nach 90 Minuten Branddauer wird Gl. (2.36) ausgewertet. Die Berechnung ergibt $\theta_a(t=90') = 587 \text{ °C}$. Damit folgt aus der Grenzzustandsgleichung (3.10)

$$\begin{aligned} Z(t=90') &= \theta_{a,cr} - \theta_a(t=90') \\ &= 595 - 587 \approx 0 \text{ °C} \end{aligned}$$

Die Tragfähigkeit des untersuchten Querschnitts ist also nach 90 Minuten Branddauer nahezu erschöpft.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird für 60, 75 und 90 Minuten Branddauer geführt.

In Tabelle 3.11 sind die Verteilungsannahmen vereinfachend nur für 90 Minuten Branddauer zusammengestellt.

Tabelle 3.11 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis eines Stahlträgers

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
M_g	Mittelwert 157,5 kNm	N	157,5 kNm	7,9 kNm
M_q	90 % Fraktile 157,5 kNm	GU	103,5 kNm	41,4 kNm
f_{yk}	5 % Fraktile 235 MN/m ²	LN	255,5 MN/m ²	12,8 MN/m ²
$a_{a'}$	5 % Frakt. $4,71 \cdot 10^6$ J/m ³ K	LN	$5,58 \cdot 10^6$	$0,56 \cdot 10^6$
λ_p	Mittelwert 0,20 W/mK	LN	0,20 W/mK	0,03 W/mK
d_p	Mittelwert 0,012 m	LN	0,012 m	0,0012 m
A_i	90 % Fraktile	LN		
	$A_1 = 3590,2$ °C		2834,3 °C	566,9 °C
	$A_2 = 5044,3$ °C		3982,3 °C	796,5 °C
	$A_3 = 3219,0$ °C		2541,3 °C	508,3 °C
	$A_4 = 778,9$ °C		614,9 °C	123,0 °C

1) siehe Tabelle 3.3

Die berechneten Ergebnisse für den Nachweis mit streuenden Einflußparametern sind in Tabelle 3.12 zusammengestellt. Der Sicherheitsindex β_{fi} wird im Verlauf des Brandgeschehens kleiner und entsprechend steigt die Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ an.

Anhand der berechneten Wichtungsfaktoren α_i gehören

- Nutzlast	$\alpha_{Mq,90'}$	= -0,0771
- therm. Wert Stahl	$\alpha_{a',90'}$	= 0,1729
- Wärmeleitfähigkeit Bekl.	$\alpha_{\lambda p,90'}$	= -0,2706

- Dicke Bekleidung	$\alpha_{dp,90'}$	= 0,1878
- Heißgastemperatur	$\alpha_{A1,90'}$	= -0,8969
	$\alpha_{A2,90'}$	= 0,2171
<hr/>		
	$\Sigma \alpha_i^2$	= 0,9951 \approx 1

zu den Einflußgrößen, deren Streuung einen nennenswerten Einfluß auf den Zuverlässigkeitsnachweis ausüben. Die übrigen Einflußgrößen können beim Nachweis mit den Nennwerten eingesetzt werden.

Tabelle 3.12 Sicherheitsindex β_{fi} , Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und Wichtungsfaktoren α_i für den vereinfachten Nachweis eines Stahlträgers (Eurocode 3 Teil 1-2, Verfahren der kritischen Temperatur)

	Branddauer [min]		
	60	75	90
β_{fi}	2,679	2,11	1,763
$p_{f,fi}$	$3,6956 \cdot 10^{-3}$	$1,7434 \cdot 10^{-2}$	$3,895 \cdot 10^{-2}$
α_{Mg}	-0,0326	-0,0324	-0,0311
α_{Mq}	-0,0835	-0,0804	-0,0771
α_{fy}	0,0436	0,0425	0,0411
$\alpha_{a'}$	0,2439	0,2108	0,1729
$\alpha_{\lambda p}$	-0,3817	-0,3299	-0,2706
α_{dp}	0,2649	0,2290	0,1878
α_{A1}	-0,8339	-0,8677	-0,8969
α_{A2}	0,1378	0,1772	0,2171
α_{A3}	0,0185	0,0271	0,0375
α_{A4}	-0,0009	-0,0015	-0,0023

3.4.1.4 Numerische Untersuchung einer Stütze

Als Beispiel wird eine Stütze mit dem in Bild 3.9 dargestellten Querschnitt berechnet [3/17]; die Stütze ist zentrisch auf Druck beansprucht.

Die Stütze wird entsprechend der ETK nach DIN 4102 Teil 2 [3/18] 4seitig brandbeansprucht und zum Schutz vor zu schneller Erwärmung kastenförmig mit Vermiculiteplatten bekleidet. Die brandschutztechnische Bemessung erfolgt für 90 Minuten Branddauer. Nach [3/20], Tafel 3 ist dafür eine Plattendicke von 20 mm erforderlich.

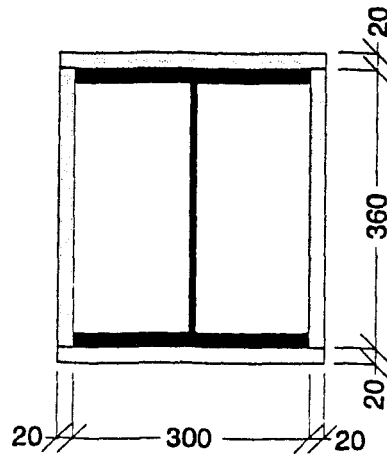


Bild 3.9 Querschnitt der Stahlstütze

Der Bemessung liegen zugrunde:

Baustoff:	Stahl S 235	$f_{yk} = 235 \text{ MN/m}^2$ $f_{yd} = 235/1,1 = 214 \text{ MN/m}^2$
	Bekleidung	Vermiculite Platten (kastenförmig)
Querschnitt:	Stahl	HE 360 B $A = 181 \text{ cm}^2$ $U/A = 73 \text{ m}^{-1}$
	Bekleidung	vorh. d = 20 mm
Schnittgrößen:	Ständige Last	$N_g = 920 \text{ kN}$
	Nutzlast	$N_q = 1370 \text{ kN}$
Bemessungsschnittgröße:		$N_{Sd} = \gamma_g \cdot N_g + \gamma_q \cdot N_q$ $N_{Sd} = 1,35 \cdot 920 + 1,50 \cdot 1370 = 3297 \text{ kN}$
Bemessungswert der Tragfähigkeit:		$N_{b,Rd} = \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_{yk} / \gamma_{M1}$ $N_{b,Rd} = 0,8756 \cdot 1,0 \cdot 181 \cdot 235 / 1,1 \cdot 10^{-1}$ $N_{b,Rd} = 3385 \text{ kN.}$

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.10) wird nach 90 Minuten Branddauer ausgewertet.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $N_{fi,Ed}$ wird aus der entsprechenden Schnittgröße bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_g = \gamma_q = 1,0$ und dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1} = 0,5$ berechnet:

$$\begin{aligned} N_{fi,Ed} &= \gamma_g \cdot N_g + \gamma_q \cdot \psi_{1,1} \cdot N_q \\ &= 1,0 \cdot 920 + 1,0 \cdot 0,5 \cdot 1370 = 1605 \text{ kN.} \end{aligned}$$

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes $R_{fi,d,0}$ wird nach Gl. (2.33) zu

$$\begin{aligned} N_{b,fi,t,Rd} &= k_{y,0,max} \cdot N_{b,Rd}/1,2 = 3103 \text{ kN} \\ \text{mit } k_{y,0,max}(t=0) &= 1,0 \\ N_{b,Rd}(\gamma_M=1,0) &= 3385 \cdot 1,1 = 3724 \text{ kN.} \end{aligned}$$

Für den Ausnutzungsfaktor μ_o nach Gl. (2.25)

$$\mu_o = 1605 / 3103 = 0,52$$

wird nach Gl. (2.24) die kritischen Temperatur $\theta_{a,cr} = 578 \text{ }^\circ\text{C}$.

Zur Berechnung der Stahltemperatur nach 90 Minuten Branddauer wird Gl. (2.36) ausgewertet. Die Berechnung ergibt $\theta_a(t=90') = 488 \text{ }^\circ\text{C}$. Damit wird die Grenzzustandsgleichung (3.10)

$$\begin{aligned} Z(t=90') &= \theta_{a,cr} - \theta_a(t=90') \\ &= 578 - 488 \gg 0 \text{ }^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Der untersuchte Querschnitt hat also nach 90 Minuten Branddauer noch Tragfähigkeitsreserven. Die relativ hoch erscheinende "Tragfähigkeitsreserve" von $\Delta\theta \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ist u. a. dadurch zu erklären, daß der Wert für die Bekleidungsdicke $d = 20 \text{ mm}$ in [3/20], Tabelle 3 für U/A -Werte 70 m^{-1} bis 89 m^{-1} gilt. Für $U/A = 89 \text{ m}^{-1}$ ergibt sich die Stahltemperatur $\theta_a(t=90') = 537 \text{ }^\circ\text{C}$ und damit eine nur noch halb so große Tragfähigkeitsreserve.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird nach 60, 75 und 90 Minuten Branddauer geführt.

In Tabelle 3.13 sind die Verteilungsannahmen vereinfachend nur für 90 Minuten zusammengestellt.

Tabelle 3.13 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis einer Stahlstütze (für f_y , a_a' , λ_p und A_i siehe Tabelle 3.11)

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
N_g	Mittelwert 920 kN	N	920 kN	46 kN
N_q	90 % Fraktile 1370 kN	GU	900,2 kN	360,1 kN
d_p	Mittelwert 0,020 m	LN	0,020 m	0,0020 m

1) siehe Tabelle 3.3

Die Ergebnisse des Nachweises mit streuenden Einflußparametern sind in Tabelle 3.14 zusammengestellt.

Aufgrund der berechneten Wichtungsfaktoren α_i gehören

- Nutzlast	$\alpha_{Mq,90'}$	= -0,1168
- therm. Wert Stahl	$\alpha_{a',90'}$	= 0,2210
- Wärmeleitfähigk. Bekl.	$\alpha_{\lambda p,90'}$	= -0,3602
- Dicke Bekleidung	$\alpha_{dp,90'}$	= 0,2591
- Heißgastemperatur	$\alpha_{A1,90'}$	= -0,8453
	$\alpha_{A2,90'}$	= 0,1538
<hr/>		
	$\Sigma \alpha_i^2$	= 0,9967 \approx 1

zu den Einflußgrößen, deren Streuung einen nennenswerten Einfluß auf den Zuverlässigkeitsnachweis ausüben. Die anderen Einflußgrößen spielen eine untergeordnete Rolle und können beim Nachweis mit ihren Nennwerten eingesetzt werden.

Tabelle 3.14 Sicherheitsindex β_{fi} , Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und Wichtungsfaktoren α_i für den vereinfachten Nachweis einer Stahlstütze (Eurocode 3 Teil 1-2, Verfahren der kritischen Temperatur

	Branddauer [min.]		
	60	75	90
β_{fi}	3,464	2,781	2,279
$p_{f,fi}$	$2,665 \cdot 10^{-4}$	$2,7119 \cdot 10^{-3}$	$1,1341 \cdot 10^{-2}$
α_{Ng}	-0,0294	-0,0294	-0,0292
α_{Nq}	-0,1210	-0,1168	-0,1132
α_{fy}	0,0454	0,0448	0,0441
$\alpha_{a'}$	0,2617	0,2428	0,2210
α_{cp}	-0,4236	-0,3956	-0,3602
α_{dp}	0,3065	0,2845	0,2591
α_{A1}	-0,7928	-0,8192	-0,8453
α_{A2}	0,0981	0,1252	0,1538
α_{A3}	0,0108	0,0155	0,0212
α_{A4}	-0,0004	-0,0007	-0,0011

3.5 Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 4 Teil 1-2

3.5.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren im Anhang E

Das vereinfachte Nachweisverfahren mit Hilfe von reduzierten Querschnittswerten wurde im Abschnitt 2.3.4.2 beschrieben. Bei dem Verfahren werden zur Ermittlung des Bemessungswertes des aufnehmbaren Biegemomentes der Beton im Druckbereich der Decke, der Obergurt, Steg und Untergurt des Stahlprofils sowie die Bewehrung in den ausbetonierten Kammern berücksichtigt.

3.5.1.1 Grenzzustandsgleichung

Die Grenzzustandsgleichung für Biegebauteile wird nach Gl. (3.14) bestimmt:

$$Z(t) = M_{Rd,fi}(t) - M_{Sd,fi}(t) \geq 0 \quad (3.14)$$

mit $M_{Rd,fi}(t) = f(f_{ay}(20^{\circ}\text{C}), f_{ry}(20^{\circ}\text{C}), f_{ck}(20^{\circ}\text{C}), k_a, k_r)^2$

Bemessungswert des aufnehmbaren Biegemoments im Brandfall, berechnet nach Eurocode 4 Teil 1-2, Anhang E:

mit	$f_{ay,20^{\circ}\text{C}}$	Charakteristischer Wert für die Festigkeit an der Streckgrenze des Baustahls bei 20 °C
	$f_{sy,20^{\circ}\text{C}}$	Charakteristischer Wert für die Festigkeit an der Streckgrenze des Betonstahls bei 20 °C
	$f_{c,20^{\circ}\text{C}}$	Charakteristischer Wert für die Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen bei 20 °C
	k_a	temperaturabhängiger Reduktionsfaktor für die Streckgrenze des unteren Flansches des Baustahlprofils nach Eurocode 4 Teil 1-2, Anhang E, Tabelle E.4
	k_r	temperaturabhängiger Reduktionsfaktor für die Streckgrenze der Bewehrung nach Eurocode 4 Teil 1-2, Anhang E, Tabelle E.5

$M_{Sd,fi}(t) = f(g_{fi,d}, p_{fi,d})$

Bemessungswert des aufzunehmenden Biegemoments im Brandfall nach Eurocode 1 Teil 2-2 (s. Abschnitt 2.3.1.2)

2) Es sind nur die Einflußparameter aufgeführt, die als streuende Parameter im Abschnitt 3.5.1.2 berücksichtigt werden

3.5.1.2 Streuung der Einflußgrößen

Wie in den vorhergehenden Abschnitten 3.3 und 3.4 werden die Streuungen der geometrischen Einflußgrößen (Abmessungen der Deckenplatte, Abmessungen des Stahlprofils, Querschnittsfläche der Betonstahlbewehrung) wegen ihres geringen Einflusses auf den Zuverlässigkeitsnachweis vernachlässigt. Die als streuende Größen in der Grenzzustandsgleichung (3.14) berücksichtigten Einflußgrößen sind in Tabelle 3.15 mit ihren Nennwerten, Verteilungen und Variationskoeffizienten zusammengestellt.

Tabelle 3.15 Nennwert, Verteilung und Variationskoeffizient der Einflußgrößen des vereinfachten Nachweisverfahrens mit Hilfe reduzierter Querschnittswerte nach Eurocode 4 Teil 1-2, Anhang E

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung	Variationskoeffizient
ständige Last $g_{fi,d}$, $G_{fi,d}$	Mittelwert	normal	0,05
Nutzlast $p_{fi,d}$, $P_{fi,d}$	90 % Fraktile	Gumbel	0,40
Baustahlfestigkeit $f_{ay,20^{\circ}\text{C}}$	5 % Fraktile	log. normal	0,05
Betonstahlfestigkeit $f_{sy,20^{\circ}\text{C}}$	5 % Fraktile	log. normal	0,05
Betonfestigkeit $f_{c,20^{\circ}\text{C}}$	5 % Fraktile	log. normal	0,15
temp.-abh. Reduktionsfaktor			
Streckgrenze Baustahl k_a	50 % Fraktile	log. normal	0,20
temp.-abh. Reduktionsfaktor			
Streckgrenze der Bewehrung k_{tr}	50 % Fraktile	log. normal	0,20

3.5.1.3 Numerische Untersuchung eines Deckenträgers

Als Beispiel wird der im Bild 3.10 dargestellte Querschnitt eines Einfeldträgers mit konstanter Streckenlast aus [3/14] berechnet.

Der Deckenträger wird entsprechend der ETK nach DIN 4102 Teil 2 [3/18] 3seitig brandbeansprucht. Die brandschutztechnische Bemessung erfolgt für 90 Minuten Branddauer.

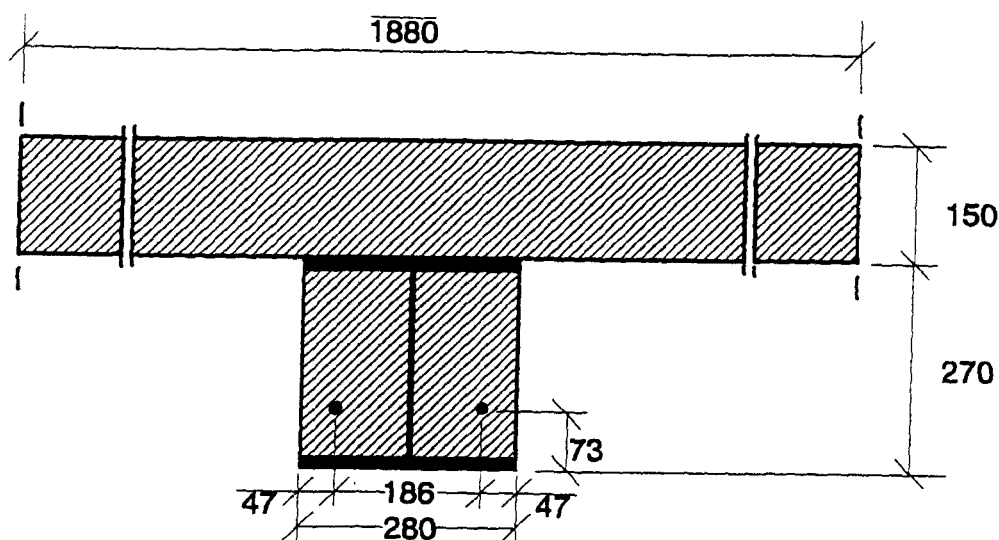


Bild 3.10 Querschnitt des Deckenträgers

Der Bemessung liegen zugrunde:

Baustoff:	Stahl S 235	$f_{ay,20^{\circ}\text{C}} = 235 \text{ MN/m}^2$
	Betonstahl S 500	$f_{sy,20^{\circ}\text{C}} = 500 \text{ MN/m}^2$
	Beton C 25/35	$f_{c,20^{\circ}\text{C}} = 25 \text{ MN/m}^2$
Querschnitt:	Stahl	HE 280 A
		$A = 97,3 \text{ cm}^2$
	Betonstahl	vorh. $A_s = 6,3 \text{ mm}^2$ (2 ϕ 12)
Schnittgrößen:	Ständige Last	$M_g = 160 \text{ kNm}$
	Nutzlast	$M_q = 120 \text{ kNm}$
Bemessungsschnittgröße:	$M_{Sd} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot M_q$	
	$M_{Sd} = 1,35 \cdot 160 + 1,50 \cdot 120 = 396 \text{ kNm}$	

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.14) wird nach 90 Minuten Branddauer ausgewertet.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $M_{fi,Sd}$ wird aus den entsprechenden Schnittgrößen bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_g = \gamma_q = 1,0$ und dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1} = 0,5$ berechnet:

$$\begin{aligned}
 M_{fi,Sd}(t=90') &= \gamma_g \cdot Mg + \gamma_q \cdot \psi_{1,1} \cdot M_q \\
 &= 1,0 \cdot 160 + 1,0 \cdot 0,5 \cdot 120 = 220 \text{ kNm.}
 \end{aligned}$$

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes $M_{fi,Rd}$ wird nach den im Eurocode 4 Teil 1-2, Anhang E angegebenen Tabellen und Gleichungen zu

$$M_{fi,Rd}(t=90') = 237,5 \text{ kNm.}$$

Damit wird die Grenzzustandsgleichung (3.14)

$$\begin{aligned}
 Z(t=90') &= M_{fi,Rd}(t=90') - M_{fi,Sd}(t=90') \\
 &= 237,5 - 220 = 17,5 \text{ kNm.}
 \end{aligned}$$

Die Tragfähigkeit des untersuchten Querschnitts ist nach 90 Minuten Branddauer nahezu erschöpft.

Das Ergebnis wird durch die Angaben in der Bemessungstabelle 4.1 im Eurocode 4 Teil 1-2 bestätigt: dort wird zur Einstufung des vorhandenen Querschnitts in die Feuerwiderstandsklasse R 90 eine Brandschutzzulage von erf. $A_s = 6,3 \text{ mm}^2$ gefordert, was der im Beispiel vorhandenen Brandschutzzulage von $2 \phi 12$ entspricht.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird für 60, 75 und 90 Minuten Branddauer mit den in Tabelle 3.16 zusammengestellten Verteilungsannahmen geführt.

Die Ergebnisse des Nachweises mit streuenden Einflußparametern sind in Tabelle 3.17 zusammengestellt. Der Sicherheitsindex β_{fi} wird im Verlauf des Brandgeschehens kleiner und entsprechend steigt die Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ an.

Tabelle 3.16 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis eines Deckenträgers

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
M_g	Mittelwert 160 kNm	N	160 kNm	8,0 kNm
M_q	90 % Fraktile 120 kNm	GU	78,9 kNm	31,5 kNm
$f_{ay,20^\circ\text{C}}$	5 % Fraktile 235 MN/m ²	LN	255,5 MN/m ²	12,8 MN/m ²
$f_{sy,20^\circ\text{C}}$	5 % Fraktile 500 MN/m ²	LN	543,5 MN/m ²	27,2 MN/m ²
$f_{c,20^\circ\text{C}}$	5 % Fraktile 25 MN/m ²	LN	32,4 MN/m ²	4,9 MN/m ²
k_a	50 % Fraktile	LN		
	t = 60 min.: 0,146		0,149	0,0298
	t = 75 min.: 0,113		0,115	0,023
	t = 90 min.: 0,079		0,081	0,016
k_T	50 % Fraktile	LN		
	t = 60 min.: 0,739		0,754	0,151
	t = 75 min.: 0,563		0,574	0,115
	t = 90 min.: 0,397		0,405	0,081

1) siehe Tabelle 3.3

Aufgrund der berechneten Wichtungsfaktoren α_i haben folgende Einflußgrößen nennenswerten Einfluß auf die Zuverlässigkeit

- Nutzlast	$\alpha_{Mq,90'}$	= -0,8979
- ständige Last	$\alpha_{Mg,90'}$	= -0,2207
- Baustahlfestigkeit	$\alpha_{fay,90'}$	= 0,2397
- Betondruckfestigkeit	$\alpha_{fck,90'}$	= 0,1824
- Reduktionsfaktor k_a	$\alpha_{ka,90'}$	= 0,1324
- Reduktionsfaktor k_T	$\alpha_{kT,90'}$	= 0,1862
$\Sigma \alpha_i^2$		= 0,9979 \approx 1.

Die übrigen Einflußgrößen spielen eine untergeordnete Rolle, so daß sie beim Nachweis mit ihren Nennwerten eingesetzt werden können.

Tabelle 3.17 Sicherheitsindex β_{fi} , Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und Wichtungsfaktoren α_i für den vereinfachten Nachweis eines Deckenträgers (Eurocode 4 Teil 1-2, Anhang E)

	Branddauer [min]		
	60	75	90
β_{fi}	3,872	3,277	2,550
$p_{f,fi}$	$5,3908 \cdot 10^{-5}$	$5,2492 \cdot 10^{-4}$	$5,3780 \cdot 10^{-3}$
α_{Mg}	-0,1570	-0,1811	-0,2207
α_{Mq}	-0,9123	-0,9096	-0,8979
α_{fay}	0,1741	0,2005	0,2397
α_{fsy}	0,0538	0,0508	0,0470
α_{fck}	0,2023	0,1871	0,1824
α_{ka}	0,1529	0,1458	0,1324
α_{kr}	0,2133	0,2018	0,1862

3.6 Vereinfachte Tragfähigkeitsnachweise im Eurocode 5 Teil 1-2

3.6.1 Δd -Verfahren (Effective cross-section method)

Beim vereinfachten Tragfähigkeitsnachweis mit dem Δd -Verfahren nach Eurocode 5 Teil 1-2, Abschnitt 4.1 wird die Abbrandtiefe d um einen Betrag Δd erhöht, so daß für den verkleinerten Restquerschnitt mit den Festigkeits- und Verformungseigenschaften wie bei der normalen Bemessung gerechnet werden kann. Im Abschnitt 2.3.5 werden detaillierte Angaben zum Δd -Verfahren gemacht.

3.6.1.1 Grenzzustandsgleichung

Die Grenzzustandsgleichung für Biegebauteile wird nach Gl. (3.15) bestimmt:

$$Z(t) = M_{Rd,fi}(t) - M_{Sd,fi}(t) \geq 0 \quad (3.15)$$

mit $M_{Rd,fi}(t) = f_{m,y,d,fi} \cdot W_{fi} / k_m$

Bemessungswert des aufnehmbaren Biegemoments im Brandfall, berechnet

mit $f_{m,y,d,fi}$ Bemessungswert der Biegefestigkeit im Brandfall

W_{fi} Widerstandsmoment des Restquerschnitts

k_m Querschnittsfaktor nach Eurocode 5 Teil 1-1, Abschnitt 5.1.6
= 0,7 für Rechteckquerschnitte

$M_{Sd,fi}(t) = f(g_{fi,d}, q_{fi,d})$

Bemessungswert des aufzunehmenden Biegemoments im Brandfall nach Eurocode 1 Teil 2-2 (s. Abschnitt 2.3.1.2).

Für Stützen gilt Gl. (3.16):

$$Z(t) = N_{Rd,fi}(t) - N_{Sd,fi}(t) \geq 0 \quad (3.16)$$

mit $N_{Rd,fi}(t) = f_{c,o,d,fi} \cdot k_{c,y,fi} \cdot A_{fi}$

Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft im Brandfall, berechnet

mit $f_{c,o,d,fi}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit im Brandfall

$k_{c,y,fi}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Stützenschlankheit im Brandfall nach Eurocode 5 Teil 1-1, Abschnitt 5.2.1

A_{fi} Querschnittsfläche des Restquerschnitts

$N_{Sd,fi}(t) = f(N_{fi,G,d}, N_{fi,Q,d})$

Bemessungswert der aufzunehmenden Normalkraft im Brandfall nach Eurocode 1 Teil 2-2 (s. Abschnitt 2.3.1.2).

3.6.1.2 Streuung der Einflußgrößen

Beim Δd -Verfahren werden auf der Widerstandsseite die Festigkeitswerte des Holzes und die Abbrandtiefe sowie auf der Einwirkungsseite die ständige Last und die Nutzlast als streuende Einflußgrößen vorgegeben. In Tabelle 3.18 sind die Einflußgrößen mit ihren Nennwerten, Verteilungen und Variationskoeffizienten zusammengestellt.

Tabelle 3.18 Nennwert, Verteilung und Variationskoeffizient der Einflußgrößen beim Δd -Verfahren nach Eurocode 5 Teil 1-2

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung	Variationskoeffizient
ständige Last $g_{fi,d}$, $G_{fi,d}$	Mittelwert	normal	0,05
Nutzlast $p_{fi,d}$, $P_{fi,d}$	90 % Fraktile	Gumbel	0,40
Biegefestigkeit f_{my}	5 % Fraktile	log. normal	0,15
Druckfestigkeit f_{co}	5 % Fraktile	log. normal	0,15
E-Modul $E_{0,05}$	5 % Fraktile	log. normal	0,05
Abbrandtiefe d_{ef}	95 % Fraktile	log. normal	0,15
Abbrandtiefe d_{char}	50 % Fraktile	log. normal	0,15

3.6.1.3 Numerische Untersuchung einer Pfette

Als Beispiel wird der im Bild 3.11 dargestellte Querschnitt einer über vier Felder durchlaufenden Pfette mit konstanter Streckenlast aus [3/23] berechnet.

Die Pfette wird entsprechend der ETK nach DIN 4102 Teil 2 [3/18] 4seitig brandbeansprucht. Die brandschutztechnische Bemessung erfolgt für 30 Minuten Branddauer.

Der Bemessung liegen zugrunde:

Baustoff:	Vollholz C 24	$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$
Querschnitt:	Holz	$b/h = 120 / 200 \text{ mm}$
		$A = 240 \text{ cm}^2$
Schnittgrößen:	Ständige Last	$M_g = 3,84 \text{ kNm}$
	Nutzlast	$M_q = 3,35 \text{ kNm}$

Bemessungsschnittgröße:

$$M_{Sd} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot M_q$$

$$M_{Sd} = 1,35 \cdot 3,84 + 1,50 \cdot 3,35 = 10,21 \text{ kNm.}$$

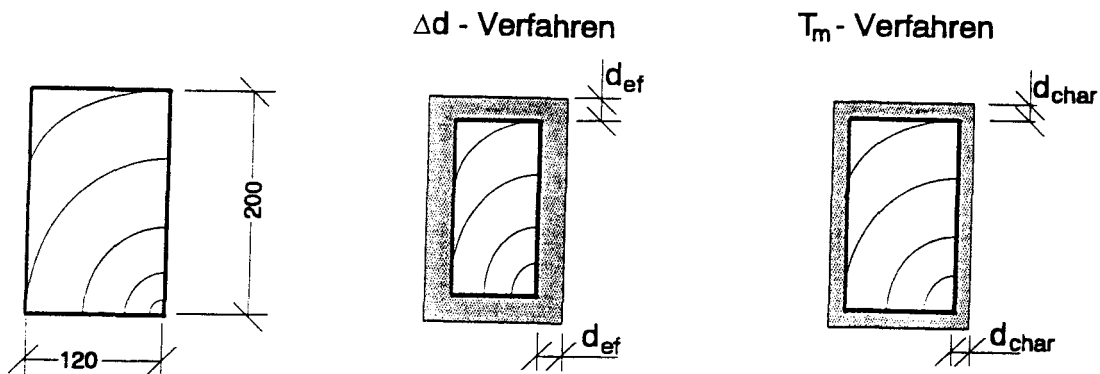


Bild 3.11 Querschnitt der Pfette

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.15) wird für 30 Minuten Branddauer ausgewertet.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $M_{Sd,fi}$ wird aus der entsprechenden Schnittgröße bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_g = \gamma_q = 1,0$ und dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1} = 0,2$ berechnet:

$$M_{Sd,fi}(t=30') = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot \psi_{1,1} \cdot M_q$$

$$= 1,0 \cdot 3,84 + 1,0 \cdot 0,2 \cdot 3,35 = 4,51 \text{ kNm.}$$

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes $M_{Rd,fi}$ wird

$$M_{Rd,fi}(t=30') = f_{m,d,fi} \cdot W_{fi} = 5,52 \text{ kNm}$$

mit

$$f_{m,d,fi} = k_{mod,f} \cdot k_f \cdot f_{m,k} / \gamma_{M,f} = 30 \text{ N/mm}^2$$

mit

$$k_{mod,f} = 1,0 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 4.1 (2))}$$

$$k_f = 1,25 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)}$$

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{M,f} = 1,0 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)}$$

$$W_{fi} = (b - 2 \cdot d_{ef}) \cdot (h - 2 \cdot d_{ef})^2 / 6 = 184092 \text{ mm}^3$$

mit

$d_{ef} = d_{char} + k_0 \cdot d_0 = 31 \text{ mm}$ $d_{char} = \beta_0 \cdot t = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ mm}$ $(\text{EC 5 T. 1-2, Gl. (3.1)})$ $k_0 = 1,0 \text{ (EC 5 T. 1-2, Tab. (4.1))}$ $d_0 = 7 \text{ mm (EC 5 T. 1-2, Gl. (4.1)).}$

Damit wird die Grenzzustandsgleichung (3.15)

$Z(t=30') = M_{Rd,fi}(t=30') - M_{Sd,fi}(t=30')$ $= 5,52 - 4,51 = 1,01 \text{ kNm.}$

Im vorliegenden Beispiel werden die erforderlichen Querschnittsabmessungen durch die Tragfähigkeitsnachweise bei Normaltemperatur festgelegt. Bei Normaltemperatur ergibt der Nachweis für reine Biegung ein Verhältnis von $M_{Sd} / M_{Rd} = 0,863$ [3/23], d. h. der Querschnitt ist annähernd ausgenutzt.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird für 30 Minuten Branddauer mit den in Tabelle 3.19 zusammengestellten Verteilungsannahmen geführt.

Tabelle 3.19 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis einer Pfette mit dem Δd -Verfahren

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
M_g	Mittelwert 3,84 kNm	N	3,84 kNm	0,192 kNm
M_q	90 % Fraktile 3,35 kNm	GU	2,20 kNm	0,881 kNm
$f_{m,y}$	5 % Fraktile 24 N/mm ²	LN	31,06 N/mm ²	4,66 N/mm ²
d_{ef}	95 % Fraktile 31 mm	LN	24,50 mm	3,68 mm

1) siehe Tabelle 3.3

Der Nachweis mit streuenden Einflußparametern ergibt nach 30 Minuten Branddauer einen

- Sicherheitsindex β_{fi} $= 3,603$

und eine

- Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ $= 1,5737 \cdot 10^{-4}$

und Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,30'}$ für die Einflußgrößen x_i :

- ständige Last $\alpha_{Mg,30'}$ $= -0,0820$

- Nutzlast $\alpha_{Mq,30'}$ $= -0,0744$

- Abbrandtiefe $\alpha_{def,30'}$ $= -0,9544$

- Holzfestigkeit $\alpha_{fmy,30'}$ $= 0,2774$

$$\sum \alpha_i^2 = 0,9999 \approx 1.$$

Anhand der berechneten Wichtungsfaktoren α_i werden alle Einflußgrößen im Abschnitt 3.7 zur Ermittlung eines einheitlichen Sicherheitsniveaus verwendet.

3.6.1.4 Numerische Untersuchung einer Stütze

Als Beispiel wird der im Bild 3.12 dargestellte Querschnitt einer zentrisch belasteten Stütze aus [3/23] berechnet.

Die Stütze wird entsprechend der ETK nach DIN 4102 Teil 2 [3/18] 4seitig brandbeansprucht. Die brandschutztechnische Bemessung erfolgt für 30 Minuten Branddauer.

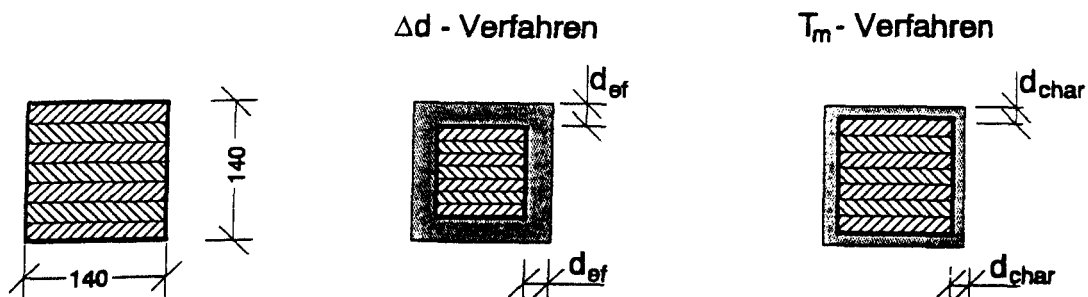


Bild 3.12 Querschnitt der Stütze

Der Bemessung liegen zugrunde:

Baustoff:	BSH GL-32	$f_{c,o,k} = 27 \text{ N/mm}^2$ $E_{0,05} = 9600 \text{ N/mm}^2$
Querschnitt:	Holz	$b/h = 140 / 140 \text{ mm}$ $A = 196 \text{ cm}^2$
System:	Länge	$l = 2,70 \text{ m}$
Schnittgrößen:	Ständige Last	$N_g = 33,48 \text{ kN}$
	Nutzlast	$N_q = 17,13 \text{ kN}$
Bemessungsschnittgröße:	$M_{Sd} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot M_q$ $M_{Sd} = 1,35 \cdot 33,48 + 1,50 \cdot 17,13 = 45,20 \text{ kN}$	

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.16) wird nach 30 Minuten Branddauer ausgewertet.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $N_{Sd,fi}$ wird aus der entsprechenden Schnittgröße bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_g = \gamma_q = 1,0$ und dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1} = 0,5$ berechnet:

$$\begin{aligned}
 N_{Sd,fi}(t=30') &= \gamma_g \cdot N_g + \gamma_q \cdot \psi_{1,1} \cdot N_q \\
 &= 1,0 \cdot 33,48 + 1,0 \cdot 0,5 \cdot 17,13 = 42,05 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes $N_{Rd,fi}$ wird

$$\begin{aligned}
 N_{Rd,fi}(t=30') &= f_{c,o,d,fi} \cdot k_{c,y,fi} \cdot A_{fi} = 59,15 \text{ kN} \\
 \text{mit } f_{c,o,d,fi} &= k_{mod,f} \cdot k_f \cdot f_{c,o,k} / \gamma_{M,f} = 31,05 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{mit } k_{mod,f} &= 1,0 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 4.1 (2))} \\
 k_f &= 1,15 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)} \\
 f_{c,o,k} &= 27 \text{ N/mm}^2 \\
 \gamma_{M,f} &= 1,0 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)} \\
 k_{c,y,fi} &= 0,27 \text{ nach EC 5 T. 1-1, Gl.(5.2.1g)} \\
 A_{fi} &= (b - 2 \cdot d_{ef}) \cdot (h - 2 \cdot d_{ef}) = 7056 \text{ mm}^2 \\
 \text{mit } d_{ef} &= d_{char} + k_0 \cdot d_0 = 28 \text{ mm} \\
 d_{char} &= \beta_0 \cdot t = 0,7 \cdot 30 = 21 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

(EC 5 T. 1-2, Gl. (3.1))

$k_0 = 1,0$ (EC 5 T. 1-2, Tab. (4.1))

$d_0 = 7 \text{ mm}$ (EC 5 T. 1-2, Gl. (4.1)).

Damit wird die Grenzzustandsgleichung (3.16)

$$\begin{aligned} Z(t=30') &= N_{Rd,fi}(t=30') - N_{Sd,fi}(t=30') \\ &= 59,15 - 42,05 = 17,10 \text{ kN.} \end{aligned}$$

Der vorliegende Querschnitt $b/h = 140/140 \text{ mm}$ hat nach 30 Minuten Branddauer noch Tragreserven. In einer Nebenrechnung wurde alternativ ein Tragfähigkeitsnachweis mit einem Querschnitt $b/h = 120/120 \text{ mm}$ durchgeführt; für diesen Querschnitt ist die Tragfähigkeit im Brandfall vor Erreichen der 30. Minute Branddauer erschöpft. Für die weiteren Untersuchungen wird deshalb der Querschnitt $b/h = 140/140 \text{ mm}$ beibehalten.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird nach 30 Minuten Branddauer mit den in Tabelle 3.20 zusammengestellten Verteilungsannahmen geführt.

Tabelle 3.20 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis einer Stütze mit dem Δd -Verfahren

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
N_g	Mittelwert 33,48 kN	N	33,48 kN	1,67 kN
N_q	90 % Fraktile 17,13 kN	GU	11,26 kN	4,50 kN
$f_{c,0}$	5 % Fraktile 27 N/mm ²	LN	34,95 N/mm ²	5,24 N/mm ²
$E_{0,05}$	5 % Fraktile 9600 N/mm ²	LN	10436 N/mm ²	522 N/mm ²
d_{ef}	95 % Fraktile 28 mm	LN	22,12 mm	3,32 mm

1) siehe Tabelle 3.3

Der Nachweis mit streuenden Einflußparametern ergibt nach 30 Minuten Branddauer einen

- Sicherheitsindex	β_{fi}	= 2,730
und eine		
- Versagenswahrscheinlichkeit	$p_{f,fi}$	= $3,1665 \cdot 10^{-3}$

und Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,30'}$ für die Einflußgrößen x_i :

- ständige Last	$\alpha_{Ng,30'}$	= -0,0802
- Nutzlast	$\alpha_{Nq,30'}$	= -0,1077
- Abbrandtiefe	$\alpha_{def,30'}$	= -0,9865
- Holzfestigkeit	$\alpha_{fc,0,30'}$	= 0,0065
- E-Modul Holz	$\alpha_{E0,05,30'}$	= 0,0931
<hr/>		
$\sum \alpha_i^2$		= 0,9999 \approx 1.

Anhand der berechneten Wichtungsfaktoren α_i werden - mit Ausnahme der Holzfestigkeit - alle Einflußgrößen im Abschnitt 3.7 zur Ermittlung eines einheitlichen Sicherheitsniveaus verwendet.

3.6.2 T_m -Verfahren (Reduced strength and stiffness method)

Beim vereinfachten Nachweisverfahren mit dem T_m -Verfahren nach Eurocode 5 Teil 1-2, Anhang A wird ein um die Abbrandtiefe d verkleinerter Restquerschnitt berechnet, für den dann mit temperaturabhängigen Festigkeits- und Verformungseigenschaften die Tragfähigkeit im Brandfall bestimmt wird. Im Abschnitt 2.3.5 sind detaillierte Angaben zum T_m -Verfahren enthalten.

3.6.2.1 Grenzzustandsgleichung

Es gelten die im Abschnitt 3.6.1.1 definierten Grenzzustandsgleichungen für Biegebau-
teile (Gl. (3.15)) und Stützen (Gl. (3.16)).

3.6.2.2 Streuung der Einflußgrößen

Beim T_m -Verfahren werden auf der Widerstandsseite die Festigkeitswerte des Holzes und die Abbrandtiefe sowie auf der Einwirkungsseite die ständige Last und die Nutzlast als streuende Einflußgrößen mit den Nennwerten, Verteilungen und Variationskoeffizienten aus Tabelle 3.18 vorgegeben.

3.6.2.3 Numerische Untersuchung einer Pfette

Als Beispiel wird die im Abschnitt 3.6.1.3 über vier Felder durchlaufende Pfette berechnet.

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.15) wird für 30 Minuten Branddauer ausgewertet.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $M_{Sd,fi}$ wird aus der entsprechenden Schnittgröße bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_g = \gamma_q = 1,0$ und dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1} = 0,2$ berechnet:

$$\begin{aligned} M_{Sd,fi}(t=30') &= \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot \psi_{1,1} \cdot M_q \\ &= 1,0 \cdot 3,84 + 1,0 \cdot 0,2 \cdot 3,35 = 4,51 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes $M_{Rd,fi}$ wird

$$\begin{aligned} M_{Rd,fi}(t=30') &= f_{m,d,fi} \cdot W_{fi} = 6,61 \text{ kNm} \\ \text{mit } f_{m,d,fi} &= k_{mod,f} \cdot k_f \cdot f_{m,k} / \gamma_{M,f} = 23,85 \text{ N/mm}^2 \\ \text{mit } k_{mod,f} &= 0,795 \text{ (EC 5 T. 1-2, Gl.(A.3))} \\ k_f &= 1,25 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)} \\ f_{m,k} &= 24 \text{ N/mm}^2 \\ \gamma_{M,f} &= 1,0 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)} \\ W_{fi} &= (b - 2 \cdot d_{char}) \cdot (h - 2 \cdot d_{char})^2 / 6 = 277248 \text{ mm}^3 \\ \text{mit } d_{char} &= \beta_0 \cdot t = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ mm} \\ &\text{(EC 5 T. 1-2, Gl. (3.1)).} \end{aligned}$$

Damit wird die Grenzzustandsgleichung (3.15)

$$\begin{aligned} Z(t=30') &= M_{Rd,fi}(t=30') - M_{Sd,fi}(t=30') \\ &= 6,61 - 4,51 = 2,10 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Im vorliegenden Beispiel werden die erforderlichen Querschnittsabmessungen durch die Tragfähigkeitsnachweise bei Normaltemperatur festgelegt (s. Abschnitt 3.6.1.3).

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird für 30 Minuten Branddauer mit den in Tabelle 3.21 zusammengestellten Verteilungsannahmen geführt.

Tabelle 3.21 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis einer Pfette mit dem T_m -Verfahren

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
M_g	Mittelwert 3,84 kNm	N	3,84 kNm	0,192 kNm
M_q	90 % Fraktile 3,35 kNm	GU	2,20 kNm	0,881 kNm
$f_{m,y}$	5 % Fraktile 24 N/mm ²	LN	31,06 N/mm ²	4,66 N/mm ²
d_{char}	50 % Fraktile 24 mm	LN	24,12 mm	3,62 mm

1) siehe Tabelle 3.3

Der Nachweis mit streuenden Einflußparametern ergibt nach 30 Minuten Branddauer einen

- Sicherheitsindex $\beta_{fi} = 2,988$

und eine

- Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi} = 1,4036 \cdot 10^{-3}$

und Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,30'}$ für die Einflußgrößen x_i :

- ständige Last	$\alpha_{Mg,30'}$	= -0,0875
- Nutzlast	$\alpha_{Mq,30'}$	= -0,0784
- Abbrandtiefe	$\alpha_{dchar'}$	= -0,9482
- Holzfestigkeit	$\alpha_{fmy,30'}$	= 0,2951
<hr/>		
$\sum \alpha_i^2$		= 0,9999 \approx 1.

Anhand der berechneten Wichtungsfaktoren α_i werden alle Einflußgrößen im Abschnitt 3.7 zur Ermittlung eines einheitlichen Sicherheitsniveaus verwendet.

3.6.2.4 Numerische Untersuchung einer Stütze

Als Beispiel wird der im Abschnitt 3.6.1.4 dargestellte Querschnitt einer zentrisch belasteten Stütze aus [3/23] berechnet.

Nachweis mit deterministischen Einflußgrößen

Die Grenzzustandsgleichung (3.16) wird nach 30 Minuten Branddauer ausgewertet.

Der Bemessungswert der Einwirkungen unter Brandbeanspruchung $N_{Sd,fi}$ wird aus der entsprechenden Schnittgröße bei Normaltemperatur durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_g = \gamma_q = 1,0$ und dem Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1} = 0,5$ berechnet:

$$\begin{aligned}
 N_{Sd,fi}(t=30') &= \gamma_g \cdot N_g + \gamma_q \cdot \psi_{1,1} \cdot N_q \\
 &= 1,0 \cdot 33,48 + 1,0 \cdot 0,5 \cdot 17,13 = 42,05 \text{ kN.}
 \end{aligned}$$

Der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes $N_{Rd,fi}$ wird

$$\begin{aligned}
 N_{Rd,fi} &= f_{c,o,d,fi} \cdot k_{c,y,fi} \cdot A_{fi} = 93,14 \text{ kN} \\
 \text{mit } f_{c,o,d,fi} &= k_{mod,f} \cdot k_f \cdot f_{c,o,k} / \gamma_{M,f} = 20,90 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{mit } k_{mod,f} &= 0,673 \text{ (EC 5 T. 1-2, Gl.(A.4))} \\
 k_f &= 1,15 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)} \\
 f_{c,o,k} &= 27 \text{ N/mm}^2 \\
 \gamma_{M,f} &= 1,0 \text{ (EC 5 T. 1-2, Abschn. 2.3)} \\
 k_{c,y,fi} &= 0,464 \text{ nach EC 5 T. 1-1, Gl.(5.2.1g)}
 \end{aligned}$$

$$A_{fi} = (b - 2 \cdot d_{char}) \cdot (h - 2 \cdot d_{char}) = 9604 \text{ mm}^2$$

mit $d_{char} = \beta_0 \cdot t = 0,7 \cdot 30 = 21 \text{ mm}$
(EC 5 T. 1-2, Gl. (3.1))

Damit wird die Grenzzustandsgleichung (3.16)

$$Z(t=30') = N_{Rd,fi}(t=30') - N_{Sd,fi}(t=30')$$
$$= 93,14 - 42,05 = 51,09 \text{ kN.}$$

Der vorliegende Querschnitt $b/h = 140/140 \text{ mm}$ hat nach 30 Minuten Branddauer noch erhebliche Tragreserven. Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Berechnungen mit dem Δd -Verfahren im Abschnitt 3.6.1.4 beizubehalten, wird der folgende Nachweis mit streuenden Einflußgrößen ebenfalls mit den Querschnittsabmessungen $b/h = 140/140 \text{ mm}$ durchgeführt.

Nachweis mit streuenden Einflußgrößen

Der Nachweis mit streuenden Einflußgrößen wird für 30 Minuten Branddauer mit den in Tabelle 3.22 zusammengestellten Verteilungsannahmen geführt.

Tabelle 3.22 Verteilungsannahmen für den vereinfachten Nachweis einer Stütze mit dem T_m -Verfahren

Einflußgröße	Nennwert	Verteilung ¹⁾	Mittelwert	Standardabweichung
N_g	Mittelwert 33,48 kN	N	33,48 kN	1,67 kN
N_q	90 % Fraktile 17,13 kN	GU	11,26 kN	4,50 kN
$f_{c,o}$	5 % Fraktile 27 N/mm ²	LN	34,95 N/mm ²	5,24 N/mm ²
$E_{0,05}$	5 % Fraktile 9600 N/mm ²	LN	10436 N/mm ²	521,8N/mm ²
d_{char}	50 % Fraktile 21 mm	LN	21,11 mm	3,17 mm

1) siehe Tabelle 3.3

Der Nachweis mit streuenden Einflußparametern ergibt nach 30 Minuten Branddauer einen

- Sicherheitsindex	β_{fi}	= 2,678
und eine		
- Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$		= $3,7030 \cdot 10^{-3}$

und Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,30'}$ für die Einflußgrößen x_i :

- ständige Last	$\alpha_{Ng,30'}$	= -0,0846
- Nutzlast	$\alpha_{Nq,30'}$	= -0,1142
- Abbrandtiefe	$\alpha_{dchar,30'}$	= -0,9850
- Holzfestigkeit	$\alpha_{fc,0,30'}$	= 0,0107
- E-Modul Holz	$\alpha_{E0,05,30'}$	= 0,0970
<hr/>		
$\sum \alpha_i^2$		= 0,9999 \approx 1.

Anhand der berechneten Wichtungsfaktoren α_i werden - mit Ausnahme der Holzfestigkeit - alle Einflußgrößen im Abschnitt 3.7 zur Ermittlung eines einheitlichen Sicherheitsniveaus verwendet.

3.7 Überprüfung der Sicherheitskonzepte

3.7.1 Sicherheitsindex

Der Sicherheitsindex $\beta_{fi}(t)$ ändert sich im Verlauf des Brandgeschehens. Er nimmt infolge der mit zunehmender Branddauer ansteigenden Brandraumtemperatur beim Normbrand (Eurocode 1 Teil 2-2, DIN 4102 Teil 2 und ISO 834 Part 1) stetig - vom Ausgangswert bei Raumtemperatur bis ggf. unter Null - ab. Bei einem natürlichen Brand würde er ein Minimum durchlaufen und im Zuge der Abkühlung wieder anwachsen [3/24].

Bei einem Normbrand kann der Nachweis ausreichender Zuverlässigkeit durch Vergleich des nach der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer vorhandenen Sicherheitsindex $\min \beta_{fi}(t)$ mit dem erforderlichen Sicherheitsindex β_{fi}^{soll} nach Gl. (3.17) erfolgen:

$$\min \beta_{fi}(t) \geq \beta_{fi}^{soll} \quad (3.17)$$

Die erforderliche Sicherheitsindex β^{soll} für Nachweise bei Normaltemperatur wird in [3/22] je nach Bedeutung der zu bemessenden Konstruktion abgestuft. Wenn die untersuchten Bauteile einem üblichen Hochbau mit mittleren Sicherheitsanforderungen angehören, gelten für den Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Normaltemperatur (für einen Bezugszeitraum von 1 Jahr) folgende Werte:

$$p_f^{soll} = 10^{-6} \qquad \beta^{soll} = 4,7 \quad (3.18)$$

Nimmt man nun für die außergewöhnliche Situation Brand in Anlehnung an statistische Auswertungen in unterschiedlich genutzten Gebäuden als mittlere Auftretenswahrscheinlichkeit eines größeren Schadenfeuers $p_1 = 10^{-7}$ je m^2 Grundfläche und Jahr an, dann beträgt die Wahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers z. B. in einem Brandabschnitt von $1000 m^2$: $p_{fi} = 10^{-4}$ pro Jahr. Mit diesen Annahmen gilt für das brandbedingte Bauteilversagen:

$$p_{f,fi} = p_f/p_{fi} \approx 10^{-2} \qquad \beta_{fi}^{soll} = 2,33 \quad (3.19)$$

Hierbei handelt es sich um mittlere Anforderungen für Brandschutznachweise, von denen bei sehr großen Brandabschnitten, z. B. im Industriebau, nach oben und bei kleineren Abschnitten, z. B. im Wohnungsbau, nach unten abgewichen werden könnte (vgl. auch [3/1]).

3.7.2 Maßgebende Unsicherheiten

Aufgrund der durchgeführten Zuverlässigkeitsnachweise in den Abschnitten 3.3 bis 3.6 sind bei den vereinfachten Nachweisverfahren der Eurocodes 2 bis 5 diejenigen Einflußgrößen bekannt, deren Streuungen nennenswerten Einfluß auf die Sicherheit der Bauteile ausüben. In den Bildern 3.13 bis 3.15 sind beispielhaft für die Stahlbeton-, Stahl- und Verbundbauteile die Anteile der dominierenden Einflußgrößen an der Gesamtstreuung des Sicherheitsabstandes aufgetragen.

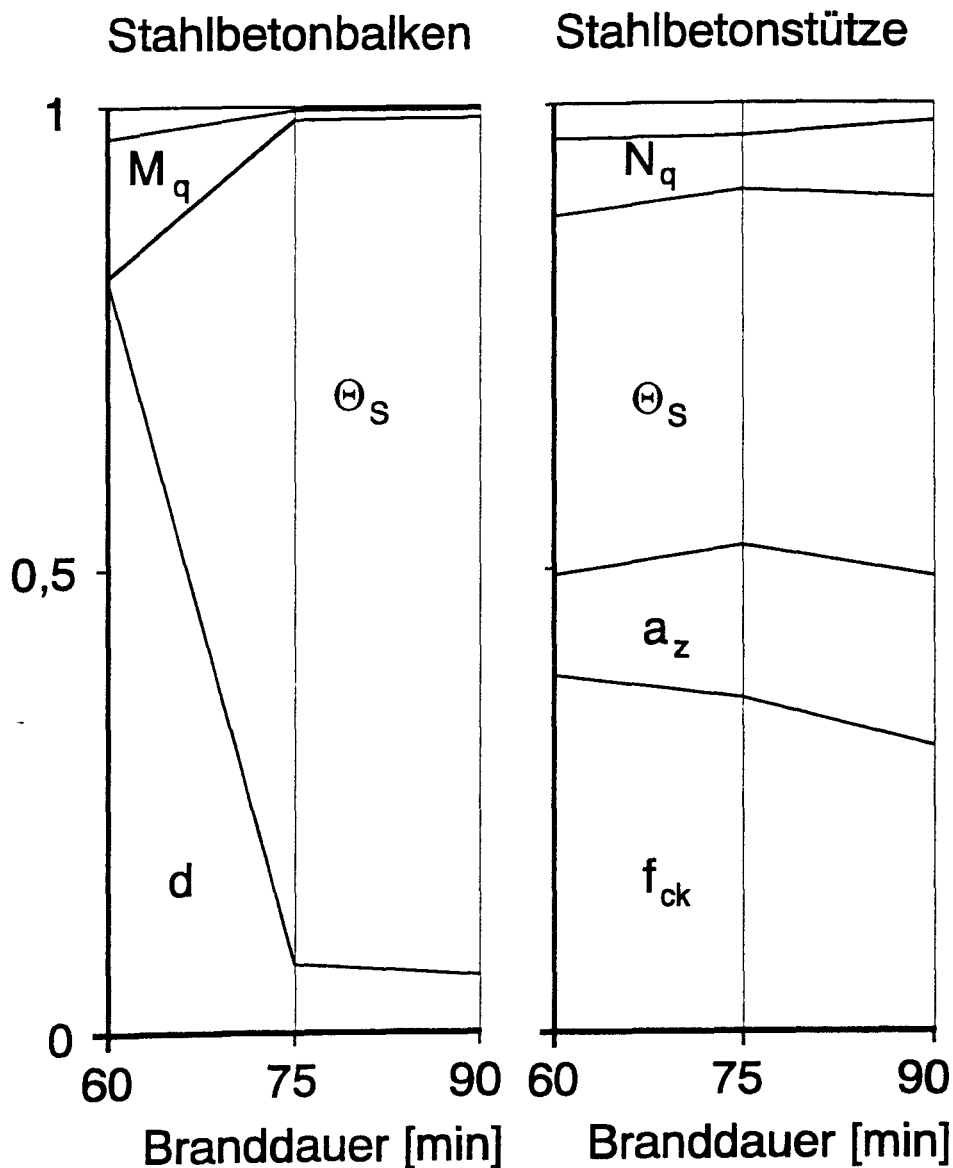


Bild 3.13 Anteile der einzelnen Parameter an den Gesamtstreuungen des Sicherheitsabstandes für die untersuchten Stahlbetonbauteile nach EC 2

Beim Stahlbetonbalken im Bild 3.13 gewinnt der Einfluß der Stahltemperatur an der Gesamtstreuung des Sicherheitsabstandes erst für Branddauern $t > 60$ Minuten an Bedeutung, wenn die Stahltemperatur über 350 °C ansteigt und damit der temperaturabhängige Wert $k_s(\theta) < 1.0$ wird (vgl. Bild 3.5).

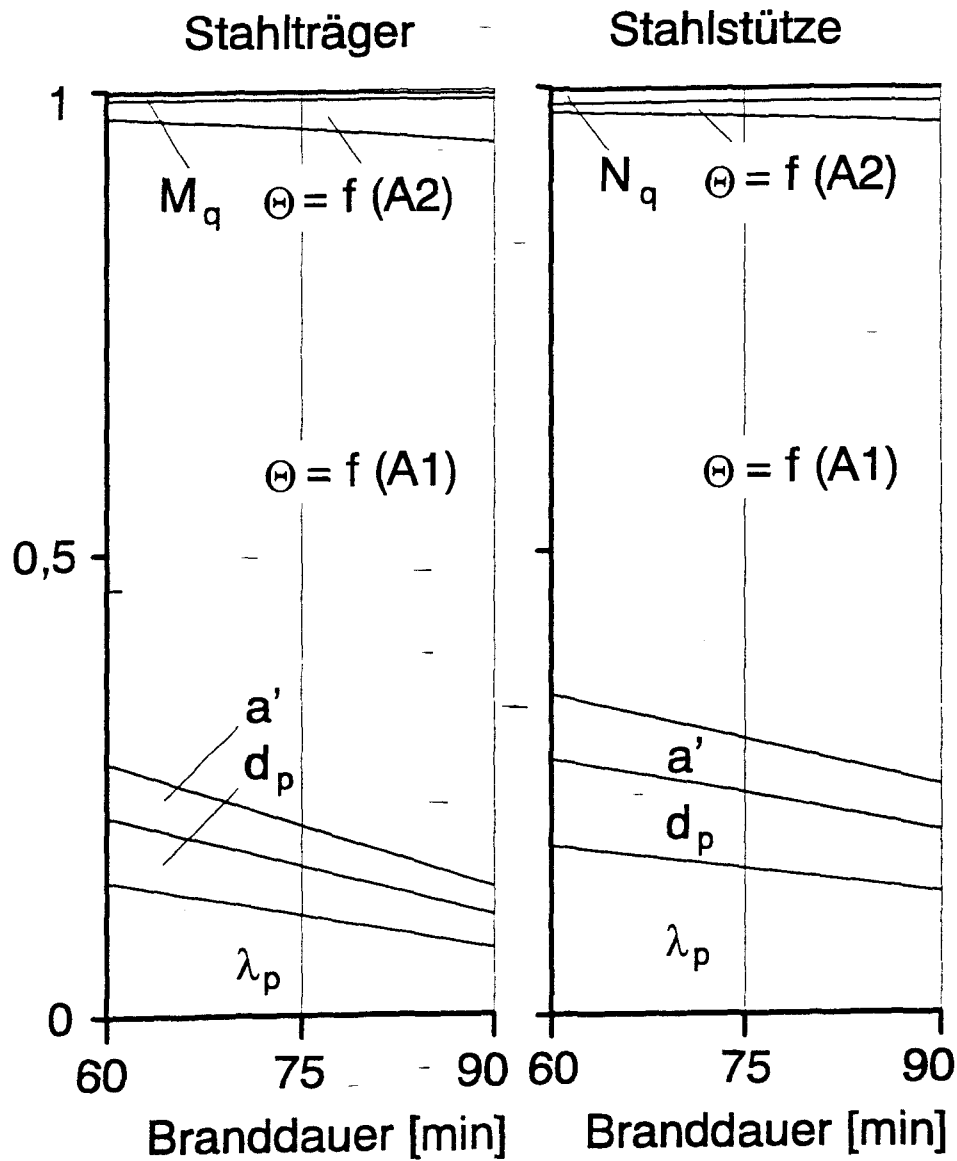


Bild 3.14 Anteile der einzelnen Parameter an den Gesamtstreuungen des Sicherheitsabstandes für die untersuchten Stahlbauteile nach EC 3

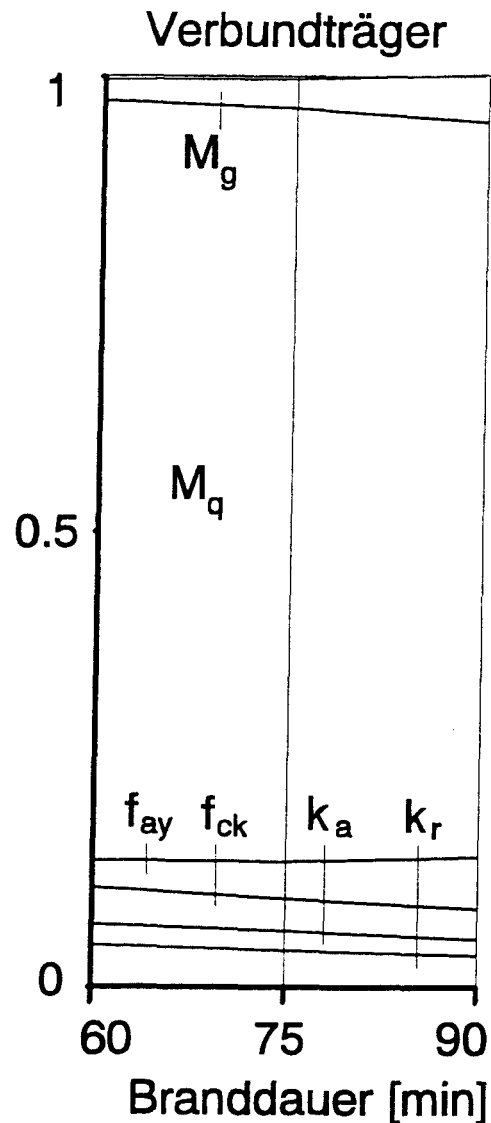


Bild 3.15 Anteile der einzelnen Parameter an den Gesamtstreuungen des Sicherheitsabstandes für den untersuchten Verbundträger nach EC 4

3.7.3 Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung

Mit Hilfe der in den Abschnitten 3.3 bis 3.6 ermittelten Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,90}$ lassen sich für die brandschutztechnische Bemessung geeignete Bemessungswerte in Abhängigkeit vom erforderlichen Sicherheitsindex β_{fi}^{soll} festlegen. Diese Bemessungswerte x_{id} können auch mit Hilfe der gegebenen Nennwerte x_{ik} und zusätzlicher Teilsicherheitsbeiwerte γ_i ausgedrückt werden. Im allgemeinen werden die Teilsicherheitsbeiwerte γ_i wie folgt definiert:

$$\gamma_i = x_{ik} / x_{id} \quad \text{für widerstehende Größen [R]} \quad (3.20a)$$

$$\gamma_i = x_{id} / x_{ik} \quad \text{für einwirkende Größen [S]} \quad (3.20b)$$

Für die Einflußgrößen der Widerstands- und Einwirkungsseite lassen sich die Bemessungswerte x_{id} und Teilsicherheitsbeiwerte γ_i direkt mit den in [3/1] und [3/24] angegebenen Formeln berechnen; im folgenden sind aus [3/1] und [3/24] diejenigen Formeln zusammengestellt, die in den Abschnitten 3.7.3.1 bis 3.7.3.5 benötigt werden.

Für die Widerstandsseite wird der Teilsicherheitsbeiwert für eine logarithmische Normalverteilung

$$\gamma_{xi} = \exp\{V \cdot (\alpha_{xi} \cdot \beta_{fi}^{soll} + k)\} \quad (3.21)$$

mit V Variationskoeffizient
 α_{xi} Wichtungsfaktor
 β_{fi}^{soll} erforderlicher Sicherheitsindex
 k Fraktalfaktor

Für die Einwirkungsseite wird der Teilsicherheitsbeiwert für eine Normalverteilung:

$$\gamma_{xi} = (1 - \alpha_{xi} \cdot \beta_{fi}^{soll} \cdot V) / (1 + k \cdot V) \quad (3.22)$$

für eine logarithmische Normalverteilung:

$$\gamma_{xi} = \exp\{V \cdot (-\alpha_{xi} \cdot \beta_{fi}^{soll} - k)\} \quad (3.23)$$

und für die Gumbel, Extremwert I Verteilung:

$$\gamma_{xi} = \frac{1 - 0,7797 \cdot V \cdot \{0,5772 + \ln[-\ln\phi(-\alpha_{xi} \cdot \beta_{fi}^{soll})] + \ln(r)\}}{1 - 0,7797 \cdot V \{0,5772 + \ln[-\ln\phi(p / 100)]\}} \quad (3.24)$$

mit ϕ normierte Normalverteilung
 r Bezugszeitraum
 p %-Fraktile.

3.7.3.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 2 Teil 1-2, normativ

Mit Hilfe der im Abschnitt 3.3.1 ermittelten Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,90'}$ und den in Abschnitt 3.7.3 angegebenen Formeln werden geeignete Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für einen erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ festgelegt. Die Ergebnisse für den Stahlbetonbalken sind in Tabelle 3.23 und für die Stahlbetonstütze in Tabelle 3.24 zusammengefaßt.

Tabelle 3.23 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis eines Stahlbetonbalkens

Einflußgröße x_i	Nennw. x_{ik}	Verteilung ²⁾	Varia.-koef.	$\alpha_{xi,90'}$	Bemessungswert x_{id}	γ_{xi}
M_q (S) ¹⁾	90 % F. GU		0,40	-0,0871	$M_{qd} = 3,64 \text{ kNm}$	0,26
θ_s (S)	90 % F. LN		0,20	-0,9843	$\theta_{sd} = 634 \text{ °C}$	1,22
d (R)	MW LN		0,15	0,1425	$d_d = 0,25 \text{ m}$	1,05

¹⁾(S): Einflußgröße der Einwirkungsseite

²⁾siehe Tabelle 3.3

(R): Einflußgröße des Bauteilwiderstandes

Tabelle 3.24 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis einer Stahlbetonstütze

Einflußgröße x_i	Nennw. x_{ik}	Verteilung ²⁾	Varia.-koef.	$\alpha_{xi,90'}$	Bemessungswert x_{id}	γ_{xi}
N_g (S) ¹⁾	M.-wert N		0,05	-0,1947	$N_{gd} = 842 \text{ kN}$	1,02
N_q (S)	90 % F. GU		0,40	-0,2431	$N_{qd} = 126 \text{ kN}$	0,36
a_z (S)	50 % F. LN		0,10	-0,4076	$a_{zd} = 38,5 \text{ mm}$	1,10
θ_s (S)	90 % F. LN		0,20	-0,5715	$\theta_{sd} = 646 \text{ °C}$	1,01
f_{ck} (R)	5 % F. LN		0,15	0,6384	$f_{cd} = 35,7 \text{ MN/m}^2$	0,98

¹⁾ und ²⁾ siehe Tabelle 3.23

Bezogen auf den im Abschnitt 3.7.1 berechneten erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ dürfte bei den Stahlbetonbauteilen die Nutzlast in der vorliegenden Kombination abgemindert werden auf 35 % des Nennwertes, verglichen mit $\psi_{1,1} = 0,5$. Dies liegt an dem hoch angesetzten Nennwert als 90 %-Fraktile der 50 Jahres-Extremwerte, der in Verbindung mit dem sehr seltenen Brandereignis auf einen häufigen "Momentanwert" (in der Grundverteilung) abgemindert werden kann [3/1]. Etwas auf der sicheren Seite liegt auch der Nennwert der Betonfestigkeit. Die konservativen Vorgaben gleichen bei Balken das Fehlen eines Teilsicherheitsbeiwertes für die Raum- oder Bauteiltemperatur - z. B. nach Tabelle 3.23 $\gamma_{\theta s} = 1,2$ - nicht ganz aus, so daß der angestrebte Sicherheitsindex zwischen der 75. und 90. Brandminute unterschritten wird (Bild 3.16).

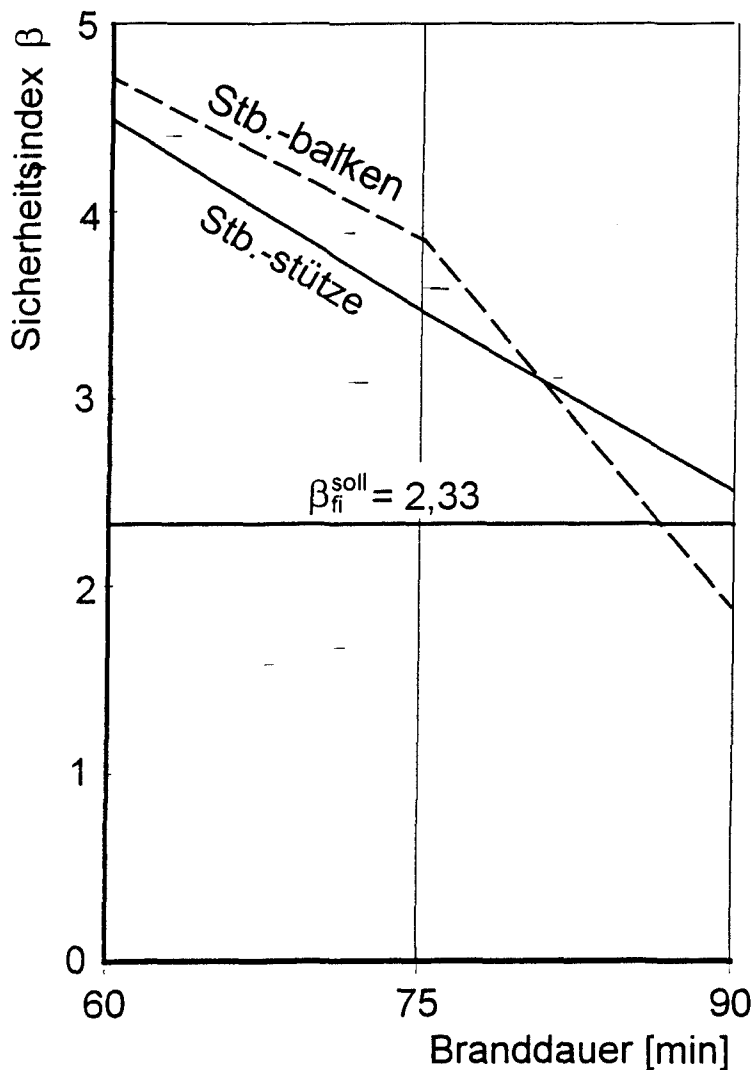


Bild 3.16 Sicherheitsindex β für Stahlbetonbauteile

3.7.3.2 Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 2 Teil 1-2, Anhang

Mit Hilfe der im Abschnitt 3.3.2 ermittelten Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,90'}$ und den in Abschnitt 3.7.3 angegebenen Formeln werden geeignete Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} in Abhängigkeit vom erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ festgelegt. Die Ergebnisse für den Stahlbetonbalken sind in Tabelle 3.25 zusammengefaßt.

Tabelle 3.25 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis (Anhang) eines Stahlbetonbalkens

Einfluß- größe x_i		Nennw. Ver- x_{ik} teil. ²⁾	Varia- koef.	$\alpha_{xi,90'}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
M_q	(S) ¹⁾	90 % F. GU	0,40	0,0812	$M_{qd} = 25,9 \text{ kNm}$	0,54
θ_s	(S)	90 % F. LN	0,20	-0,9966	$\theta_{sd} = 640 \text{ °C}$	1,23

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

Durch Beschränkung auf nur zwei Basisvariable fallen die Teilsicherheitsbeiwerte für die Nutzlast (= Kombinationsbeiwert) und für die Bauteiltemperatur etwas größer aus. In diesem Fall sind auf den ersten Blick auch keine Reserven an anderer Stelle zur Kompensation des fehlenden Teilsicherheitsbeiwertes für die Bauteiltemperatur vorhanden.

3.7.3.3 Krit. T - Verfahren im EC 3 Teil 1-2

Mit Hilfe der im Abschnitt 3.4.1 ermittelten Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,90'}$ und den in Abschnitt 3.7.3 angegebenen Formeln werden geeignete Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} in Abhängigkeit vom erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ für den Stahlträger in Tabelle 3.26 und für die Stahlstütze in Tabelle 3.27 dargestellt.

Tabelle 3.26 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis eines Stahlträgers

Einflußgröße x_i		Nennw. x_{ik}	Ver- teil. ²⁾	Varia- koef.	$\alpha_{xi,90'}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
M_q	(S) ¹⁾	90 % F.	GU	0,40	-0,0771	$M_{qd} = 40,9 \text{ kNm}$	0,26
a_a'	(R)	5 % F.	LN	0,10	0,1729	$a_{ad}' = 5,3 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2\text{K}$	0,88
λ_p	(R)	M.-wert	LN	0,15	-0,2706	$\lambda_{pd} = 0,22 \text{ W/mK}$	0,91
d_p	(R)	M.-wert	LN	0,10	0,1878	$d_{pd} = 0,011 \text{ m}$	1,05
A_1	(S)	90 % F.	LN	0,20	-0,8969	$A_{1d} = 4244 \text{ °C}$	1,19
A_2	(S)	90 % F.	LN	0,20	0,2171	$A_{2d} = 3525 \text{ °C}$	0,70
θ_a	(S)	90 % F.	LN	0,20		$\theta_{ad} = 934 \text{ °C}$	1,39

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

Tabelle 3.27 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis einer Stahlstütze

Einflußgröße x_i		Nennw. x_{ik}	Ver- teil. ²⁾	Varia- koef.	$\alpha_{xi,90'}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
N_q	(S) ¹⁾	90 % F.	GU	0,40	-0,0967	$N_{qd} = 385 \text{ kN}$	0,28
a_a'	(R)	5 % F.	LN	0,10	0,2210	$a_{ad}' = 5,3 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2\text{K}$	0,89
λ_p	(R)	M.-wert	LN	0,15	-0,3602	$\lambda_{pd} = 0,23 \text{ W/mK}$	0,88
d_p	(R)	M.-wert	LN	0,10	0,2591	$d_{pd} = 0,019 \text{ m}$	1,06
A_1	(S)	90 % F.	LN	0,20	-0,8453	$A_{1d} = 4142 \text{ °C}$	1,15
A_2	(S)	90 % F.	LN	0,20	0,1538	$A_{2d} = 3632 \text{ °C}$	0,72
θ_a	(S)	90 % F.	LN	0,20		$\theta_{ad} = 693 \text{ °C}$	1,28

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

Bei den untersuchten Stahlbauteilen müßte die Bauteiltemperatur eigentlich deutlich über den als 90 %-Fraktile interpretierten Nominalwert hinaus angehoben werden. Zur Verdeutlichung wurde aus den Hilfswerten A_1 bis A_4 für θ_a gemäß Gl. (3.25) ein mittlerer Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{\theta a}$ wie folgt bestimmt:

$$\gamma_{\theta a} = \theta_{ad} / \theta_{ak} \approx [\sum (-1)^{i+1} \cdot \xi_{90}^i \cdot A_{id}] / [\sum (-1)^{i+1} \cdot \xi_{90}^i \cdot A_{ik}] \quad (3.25)$$

Für die Bedeutung der Bezeichnungen siehe Erläuterungen zu Gl. (3.11).

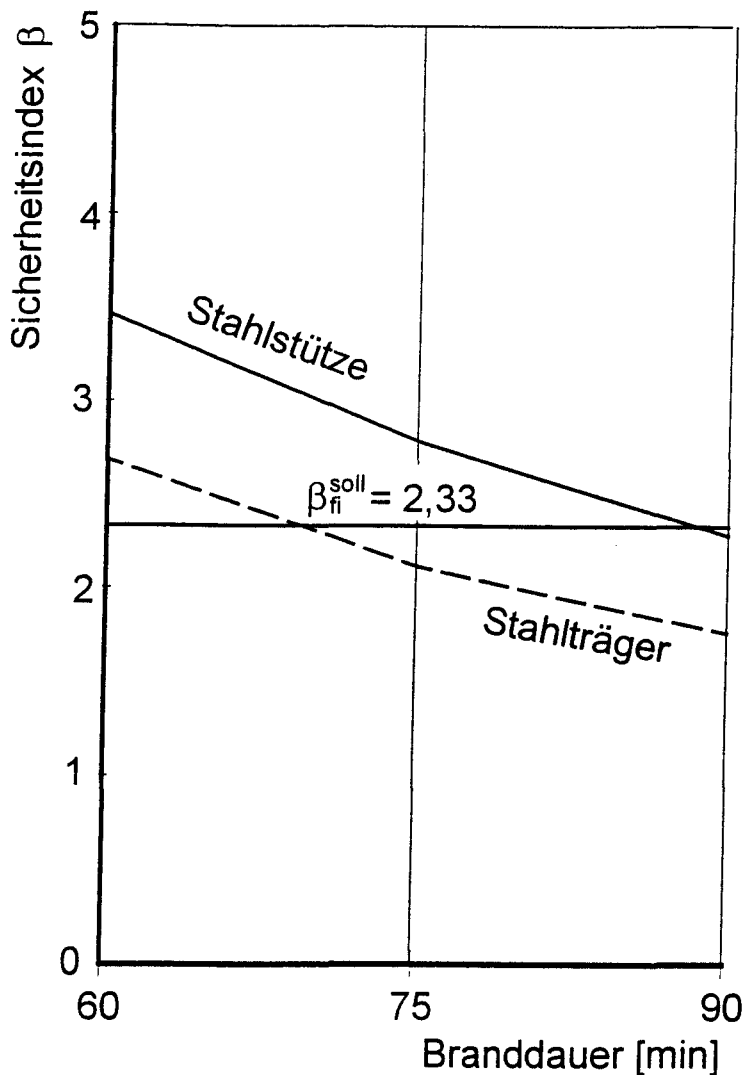


Bild 3.17 Sicherheitsindex β für Stahlbauteile

Bei den untersuchten Stahlbauteilen dürfte wiederum die Nutzlast abgemindert werden, in diesem Fall auf 30 % des Nennwertes. Ebenfalls auf der sicheren Seite liegen der als 5 %-Fraktile angenommene Wert der thermischen Stahleigenschaften $a_a' = c_a \cdot \rho_a$ und die als Mittelwert berücksichtigte Wärmeleitfähigkeit der Bekleidung λ_p ; beide Werte könnten mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{xi} = 0,9$ belegt werden. Wie bei den Stahlbetonbauteilen müßte auch bei den Stahlbauteilen die Bauteiltemperatur gegenüber dem als 90 %-Fraktile vorgegebenen Nennwert erhöht werden. Damit das vorgegebene

Sicherheitsniveau bei $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ eingehalten werden kann, wäre neben der Erhöhung der Bauteiltemperatur um 35 % auch noch der Nennwert für die Dicke der Bekleidung etwas zur "sicheren" Seite hin zu verschieben, d. h. der vorgegebene Mittelwert wäre durch einen Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{xi} = 1,05$ zu dividieren. Ohne Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte erreicht der Stahlträger das Sicherheitsniveau $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ bereits nach 70 Minuten und die Stahlstütze kurz vor der 90. Minute (Bild 3.17).

3.7.3.4 Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 4 Teil 1-2

Mit Hilfe der im Abschnitt 3.5.1 ermittelten Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,90'}$ und den in Abschnitt 3.7.3 angegebenen Formeln werden geeignete Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} in Abhängigkeit vom erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ für den Deckenträger in Tabelle 3.28 dargestellt.

Tabelle 3.28 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis eines Deckenträgers

Einfluß- größe x_i	Nennw. Ver- x_{ik} teil. ²⁾	Varia- koef.	$\alpha_{xi,90'}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
M_g (S) ¹⁾	M.-wert N	0,05	-0,2207	$M_{gd} = 164,8 \text{ kNm}$	1,03
M_q (S)	90 % F. GU	0,40	-0,8979	$M_{qd} = 108,0 \text{ kNm}$	0,90
f_{ay} (R)	5 % F. LN	0,05	0,2397	$f_{ad} = 247,4 \text{ N/mm}^2$	0,95
f_{ck} (R)	5 % F. LN	0,15	0,1824	$f_{cd} = 30,1 \text{ N/mm}^2$	0,83
k_a (S)	50 % F. LN	0,20	0,1324	$k_{ad} = 0,074$	0,94
k_r (S)	50 % F. LN	0,20	0,1862	$k_{rd} = 0,365$	0,92

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

Bei dem als Verbundbauteil untersuchten Deckenträger wäre auf der Einwirkungsseite die Nutzlast eigentlich höher anzusetzen (Kombinationsbeiwert 0,9 statt 0,5). Dagegen sollten die Reduktionsfaktoren für die Streckgrenze des Baustahls k_a und der Bewehrung k_r um jeweils 10 % verringert werden gegenüber den als 50 % Fraktile vorgegebenen Nennwerten. Dies wird jedoch offensichtlich durch die konservative Vorgabe der Festigkeiten vom Baustahl $f_{ay,20^\circ\text{C}}$ und Beton $f_{c,20^\circ\text{C}}$ als 5 % Fraktilwert kompensiert,

so daß nach 90 Minuten Branddauer das erforderliche Sicherheitsniveau bei $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ erreicht wird (Bild 3.18).

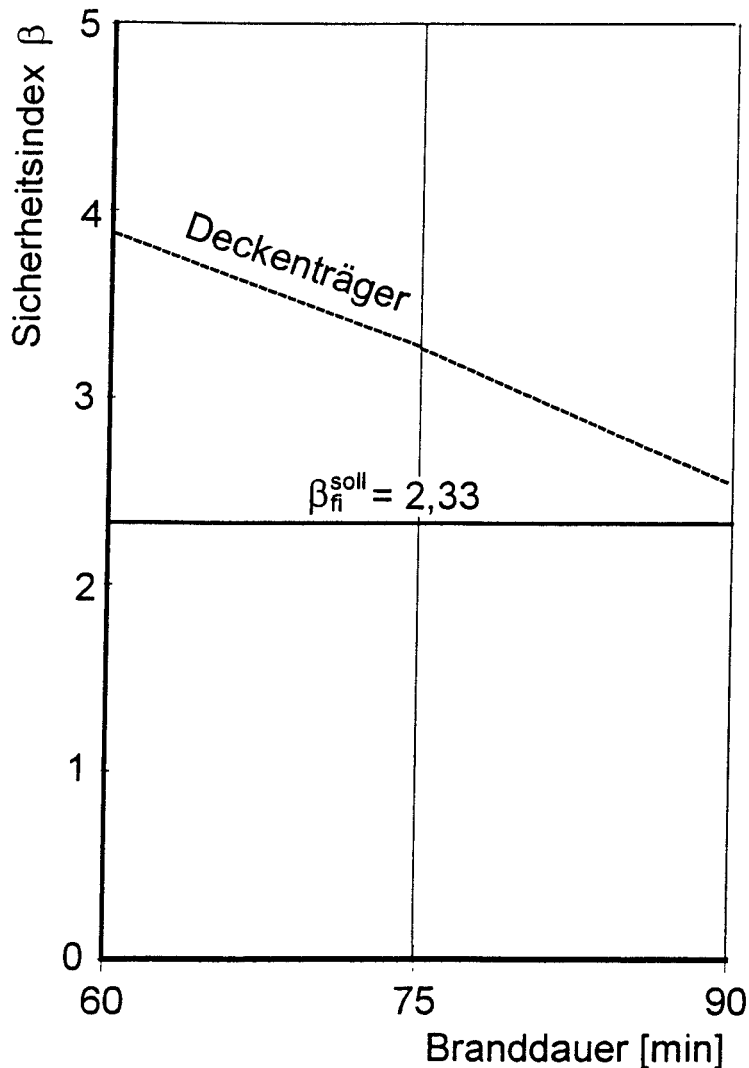


Bild 3.18 Sicherheitsindex β beim Deckenträger in Verbundbauweise

3.7.3.5 Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 5 Teil 1–2, Δd -Verfahren

Mit Hilfe der im Abschnitt 3.6.1 ermittelten Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,90}$ und den in Abschnitt 3.7.3 angegebenen Formeln werden geeignete Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} in Abhängigkeit vom erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ für die Holzpfette in Tabelle 3.29 und für die Holzstütze in Tabelle 3.30 dargestellt.

Tabelle 3.29 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis einer Holzpfette mit dem Δd -Verfahren

Einflußgröße x_i	Nennw. x_{ik}	Ver- teil. ²⁾	Varia- koef.	$\alpha_{xi,90}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
M_g (S) ¹⁾	M.-wert	N	0,05	-0,0820	$M_{gd} = 3,88 \text{ kNm}$	1,01
M_q (S)	90 % F.	GU	0,40	-0,0744	$M_{qd} = 0,87 \text{ kNm}$	0,26
$f_{m,y}$ (R)	5 % F.	LN	0,15	0,2774	$f_{m,d} = 27,9 \text{ N/mm}^2$	0,86
d_{ef} (S)	95 % F.	LN	0,15	-0,9544	$d_{ef,d} = 33,79 \text{ mm}$	1,09

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

Tabelle 3.30 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis einer Holzstütze mit dem Δd -Verfahren

Einflußgröße x_i	Nennw. x_{ik}	Ver- teil. ²⁾	Varia- koef.	$\alpha_{xi,90}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
N_g (S) ¹⁾	M.-wert	N	0,05	-0,0802	$N_{gd} = 33,81 \text{ kN}$	1,01
N_q (S)	90 % F.	GU	0,40	-0,1077	$N_{qd} = 4,80 \text{ kN}$	0,28
$E_{0,05}$ (R)	5 % F.	LN	0,05	0,0931	$E_{0,05,d} = 10323 \text{ N/mm}^2$	0,93
d_{ef} (S)	95 % F.	LN	0,15	-0,9865	$d_{ef,d} = 30,8 \text{ mm}$	1,10

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

3.7.3.6 Vereinfachtes Nachweisverfahren im EC 5 Teil 1-2, T_m -Verfahren

Mit Hilfe der im Abschnitt 3.6.2 ermittelten Wichtungsfaktoren $\alpha_{xi,90}$ und den in Abschnitt 3.7.3 angegebenen Formeln werden geeignete Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} in Abhängigkeit vom erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ für die Holzpfette in Tabelle 3.31 und für die Holzstütze in Tabelle 3.32 dargestellt.

Tabelle 3.31 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis einer Holzpfeife mit den T_m -Verfahren

Einflußgröße x_i	Nennw. x_{ik}	Ver- teil. ²⁾	Varia.- koef.	$\beta_{xi,90'}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
M_g (S) ¹⁾	M.-wert N		0,05	-0,0875	$M_{gd} = 3,88 \text{ kNm}$	1,01
M_q (S)	90 % F. GU		0,40	-0,0784	$M_{qd} = 0,87 \text{ kNm}$	0,26
$f_{m,y}$ (R)	5 % F. LN		0,15	0,2951	$f_{m,d} = 27,6 \text{ N/mm}^2$	0,87
d_{char} (S)	50 % F. LN		0,15	-0,9482	$d_{char,d} = 33,36 \text{ mm}$	1,39

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

Tabelle 3.32 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vereinfachten Nachweis einer Holzstütze mit dem T_m -Verfahren

Einflußgröße x_i	Nennw. x_{ik}	Ver- teil. ²⁾	Varia.- koef.	$\alpha_{xi,90'}$	Bemessungs- wert x_{id}	γ_{xi}
N_g (S) ¹⁾	M.-wert N		0,05	-0,0846	$N_{gd} = 33,81 \text{ kN}$	1,01
N_q (S)	90 % F. GU		0,40	-0,1142	$N_{qd} = 4,80 \text{ kN}$	0,28
$E_{0,05}$ (R)	5 % F. LN		0,05	0,0970	$E_{0,05,d} = 10323 \text{ N/mm}^2$	0,93
d_{char} (S)	50 % F. LN		0,15	-0,9850	$d_{char,d} = 29,61 \text{ mm}$	1,41

1) und 2) siehe Tabelle 3.23

Bezogen auf den im Abschnitt 3.7.1 berechneten erforderlichen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ dürfte bei den Holzbauteilen - unabhängig davon, ob als vereinfachtes Rechenverfahren das Δd - oder das T_m -Verfahren benutzt wird - die Nutzlast auf 30 % ihres Nennwertes abgemindert werden. Die Abbrandtiefe müßte beim T_m -Verfahren um 25 % gegenüber dem Nennwert erhöht werden. Die Materialfestigkeit für die Biegefestigkeit $f_{m,y,d}$ und der Elastizitätsmodul $E_{0,05}$ könnte gegenüber dem als 5 % Fraktile angesetzten Nennwert um 10 % erhöht werden.

3.8 Zusammenfassung

In den Brandschutzteilen der Eurocodes werden für die brandschutztechnische Bemessung vereinfachte Rechenverfahren zur Verfügung gestellt. Diese Verfahren wurden in unterschiedlichen europäischen Ländern entwickelt und an Brandversuchsergebnissen der jeweiligen nationalen Prüfanstalten verifiziert. Dadurch sind bei Anwendung der Verfahren Abweichungen sowohl vom bisherigen nationalen Sicherheitsniveau als auch Unterschiede der erreichten Sicherheiten zwischen den unterschiedlichen Baustoffen und Bauteilen zu erwarten. Im vorliegenden Abschnitt 3 werden die vereinfachten Rechenverfahren in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2, 3, 4 und 5 näher untersucht.

Dazu werden die vereinfachten Grenzzustandsgleichungen und die eingehenden Einflußparameter angegeben. Sofern es sich um streuende Größen handelt, werden diese aufgrund von Erfahrungswerten durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben. Damit lassen sich die durch Bemessungen nach den Eurocodes 2, 3, 4 und 5 erzielten Zuverlässigkeiten nach bewährten Methoden programmgesteuert berechnen. Neben einer Quantifizierung des Sicherheitsniveaus, erhält man Aufschluß über den Einfluß einzelner Parameter auf die Zuverlässigkeit. Damit können die derzeit empfohlenen Sicherheitselemente - in der Regel charakteristische Werte (Nennwerte) und Teilsicherheitsbeiwerte - für die jeweiligen Nachweise objektiv bewertet und erforderlichenfalls neu festgelegt werden, damit das national für notwendig erachtete Sicherheitsniveau in bestimmten Bandbreiten eingehalten wird.

An typischen Bauteilen aus dem Anwendungsbereich der vereinfachten Nachweisverfahren wird das Vorgehen bei der Sicherheitsanalyse praktisch vorgeführt. Ausgewählt werden dafür Balken bzw. Träger und Stützen aus einem Wohnhaus und aus einem Büro- und Geschäftshaus. Die Bauteile des Wohnhauses werden nach den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 und 5, d. h. in Stahlbeton- und Holzbauweise, die des Büro- und Geschäftshauses nach den Brandschutzteilen der Eurocodes 3 und 4, also in Stahl- und Verbundbauweise ausgeführt.

In der Tabelle 3.33 sind für die ausgewählten Bauteile die bei Berücksichtigung streuender Einflußparameter berechneten Sicherheitsindizes β_{ff} vergleichend gegenübergestellt. Sie liegen für die Stahlbeton-, Stahl- und Verbundbauteile, die jeweils für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten bemessen waren, zwischen 1,45 und 2,55, d. h. in einem relativ engen Streuband. Erfreulicherweise bleibt auch der Unterschied zwi-

schen den biegebeanspruchten Balken und Träger sowie den druckbeanspruchten Stützen gering. Bei den Holzbauteilen, die für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten ausgelegt waren, liegen die Sicherheitsindizes etwas über den Werten der Stahlbeton-, Stahl- und Verbundbauteile.

Tabelle 3.33 Berechnete Sicherheitsindizes β_{fi} nach 90 (EC 2, 3 und 4) bzw. 30 (EC 5) Minuten Normbrand entsprechend DIN 4102 Teil 2

Eurocode			Balken/Träger	Stütze
2	Stahlbetonkonstruktionen	Normteil	1,88	2,51
		Anhang	1,45	-
3	Stahlkonstr.		1,76	2,28
4	Verbundkonstr.		2,55	-
5	Holzkonstr.	Δd -Verf.	3,60	2,73
		T_m -Verf.	2,99	2,68

Aufgrund der durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen ergeben sich für alle vereinfachten Rechenverfahren Nutzlast und Bauteiltemperatur als die Einflußgrößen, die den größten Einfluß auf den Zuverlässigkeitsnachweis ausüben; danach folgt bei den meisten vereinfachten Rechenverfahren die jeweilige Festigkeitsgröße. In der Tabelle 3.34 sind die theoretisch erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte für diese maßgebenden Einflußgrößen für ein vorgegebenes Sicherheitsniveau $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$ zusammengestellt. Bezogen auf diesen Sicherheitsindex ergibt sich aus Tabelle 3.34 für die meisten untersuchten vereinfachten Rechenverfahren eine Abminderung der Nutzlast auf ca. 30 % des Nennwertes und eine Erhöhung der Bauteiltemperatur um bis zu 35 % gegenüber dem Nennwert. Die Materialfestigkeiten könnten in der Regel um 10 % gegenüber dem als 5 % Fraktile angesetzten Nennwert erhöht werden. Von dieser einheitlichen Bewertung muß das vereinfachte Rechenverfahren für Verbundträger ausgenommen werden.

Tabelle 3.34 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{xi} für den vorgegebenen Sicherheitsindex $\beta_{fi}^{soll} = 2,33$

Eurocode	Nutzlast		Temperatur		Festigkeit	
	Balken	Stütze	Balken	Stütze	Balken	Stütze
2 Norm Anhang	0,26	0,36	1,22	1,01	-	0,98
	0,54	-	1,23	-	-	-
3	0,26	0,28	1,39	1,28	0,88	0,89
4	0,90	-	0,94/0,92 ¹⁾	-	0,95/0,83 ²⁾	-
5 Δd-Verf. T _m -Verf.	0,26	0,28	1,09	1,10	0,86	0,93
	0,26	0,28	1,39	1,41	0,87	0,93

¹⁾ k_a/k_T -Werte -

²⁾ f_{ay}/f_c

4 Zusammenfassende Wertung und Empfehlungen

Im vorliegenden Forschungsbericht werden Vergleichsrechnungen bezüglich des Sicherheitsniveaus bei der brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen aus unterschiedlichen Baustoffen nach den Regelungen in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 5 durchgeführt.

Dazu werden im Abschnitt 2 zunächst die Rechengrundlagen zusammengestellt, wie sie baustoffübergreifend im Eurocode 1 Teil 2-2 für die Auslegungsgrundlagen und Lastannahmen und in den baustoffbezogenen Eurocodes 2 bis 5 für die brandschutztechnische Bemessung von Stahlbeton-, Stahl-, Verbund- und Holzkonstruktionen enthalten sind. Soweit in den einzelnen Eurocodes vorhanden, werden die brandschutztechnischen Nachweisverfahren anhand von Tabellen, mittels rechnerischer Näherungsverfahren und mittels exakter Rechenverfahren zusammengestellt. Für jeden Eurocode werden anhand einer Übersichtstabelle die Nachweisarten und die zugehörigen Bauteile (Decken, Balken, Stützen, usw.) dargestellt.

Im Abschnitt 3 wird das Sicherheitsniveau der Bemessung nach den Brandschutzteilen der Eurocodes überprüft. Dazu werden einleitend die Grundlagen für den Zuverlässigkeitsnachweis zusammengestellt. Anschließend werden für die Bauwerkskategorie Wohnhaus sowie Büro- und Geschäftshaus typische Bauteile ausgewählt, für die aus dem Anwendungsbereich der vereinfachten Nachweisverfahren das Vorgehen bei der Sicherheitsanalyse praktisch vorgeführt wird.

Die exemplarisch gezeigten Ergebnisse sollen einerseits belegen, daß eine Beurteilung der baustoffspezifischen Zuverlässigkeit gegen brandbedingtes Versagen mit vergleichbaren Annahmen und anerkannten Methoden möglich und aus der Sicht der Autoren in jedem Fall zur Absicherung der Eurocode-Regelungen erforderlich ist. Die Aussagen zu den hierfür maßgebenden Einflußgrößen dürften näherungsweise auch auf andere Bauteile der gleichen Bauweise zutreffen; die Zahlenwerte für die "Wichtungsfaktoren" werden jedoch - ebenso wie die errechneten Sicherheitsindizes β - stärker variieren. Sowohl für die fällige Überarbeitung der Eurocodes nach Veröffentlichung als Europäische Vornorm (ENV) und vor Einführung als Europäische Norm (EN) als auch für die in Kürze zu erstellenden Nationalen Anwendungsrichtlinien sind daher für weitere repräsentative Bauteil- und Tragwerksnachweise derartige Zuverlässigkeitsvergleiche anzustellen. Daraus können notwendige Korrekturen der Sicherheitselemente und ggf. Einschränkungen der Anwendungsgrenzen auf möglichst breiter, abgesicherter Grundlage abgeleitet werden.

5 Literatur

5.1 Literatur zum Kapitel 1

- [1/1] Haß, R.; Quast, U.: Brandverhalten von Verbundstützen mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Stützen/Riegel-Verbindungen. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 86 Akt. 2.2, 1985.
- [1/2] Haß, R.: Brandversuche an Stahlbeton und Verbundstützen. Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, Arbeitsbericht 1984-1986, Teil 1, Band A, S.80-99. Dezember 1987.
- [1/3] Hosser, D.; Dorn T.; Kiel, M.; Richter, E.: Praxisgerechte brandschutztechnische Auslegungsverfahren. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig im Auftrag des Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Az.: BI6B-810788-9. Januar 1991.
- [1/4] Schaumann, P.; Hass, R.; Falke, J.: Anwendungsbezogene Aufbereitung der neueren nationalen Forschungsergebnisse für Verbundbauteile unter Brandbeanspruchung im Spiegel internationaler Bemessungsvorschläge Projekt 210. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, 1992.
- [1/5] Quast, U.; Hass, R.; Rudolph, K.: "STABA-F, Berechnungen des Trag- und Verformungsverhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, 1984.
- [1/6] Kiel, M.: Analyse brandbeanspruchter, ebener Rahmentragwerke - ein Beitrag zum definierten Objektschutz. Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, Arbeitsbericht 1984-1986, Teil 1, Band B, S.702-730. Dezember 1987.
- [1/7] Hass, R.; Meyer Ottens, C.; Quast, U.: Verbundbau Brandschutz Handbuch, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1989.
- [1/8] Hoffend, F.: Stahlbauteile unter Brandeinwirkung. Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, Arbeitsbericht 1984-1986, Teil 1, Band A, S. 28-44. Dezember 1987.
- [1/9] Hosser, D.; Schneider, U.: Sicherheitsanforderungen für brandschutztechnische Nachweise von Stahlbetonbauteilen nach der Wärmebilanztheorie. vfdB Zeitschrift, Heft 1 und 2, 1982.

5.2 Literatur zum Kapitel 2

- [2/1] Litzner, H.-U.: Europäisches Regelwerk für den Betonbau. Beitrag in: Stahlbeton- und Spannbetontragwerke nach Eurocode 2. Springer-Verlag, 1993.
- [2/2] DIN 4102 Teil 2, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen. Ausgabe September 1977.
- [2/3] ECCS-Technical Committee T3 - Fire Safety of Steel Structures: Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, 1985.
- [2/4] Kiel, M.: Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbetonflächentragwerke unter Einschluß von Brandbeanspruchung. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, Heft 81. 1987.
- [2/5] Quast, U.; Rudolph, K.: Traglasten für Verbundstützen zugehörig zu Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102. Forschungsbericht P 86 Akt. 2.3 des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig im Auftrag der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V. (jetzt: Studiengesellschaft Stahlanwendung), Düsseldorf, 1985.
- [2/6] Twilt, L.: Design Charts for the Fire Resistance of Concrete Filled HSS Columns under Centric Loading. TNO Report Project Number 00.65.4.3900, CIDECT Number 15J-88/12-E.
- [2/7] ENV 1994-1-2: Eurocode 4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures; Part 1-2: Structural Fire Design. October 1994.
- [2/8] Quast, U.; Hass, R.; Rudolph, K.: "STABA-F ...": s. [1/5].
- [2/9] Hass, R.; Meyer-Ottens, C.; Quast, U.: Verbundbau Brandschutz Handbuch: s. [1/7].
- [2/10] Jungbluth, O.: Optimierte Verbundbauteile. aus: Stahlbau Handbuch Teil 1, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, 1982.
- [2/11] Hosser, D.; Dorn, T.; El-Nesr, O.: "Entwicklung und Absicherung praxisgerechter Näherungsverfahren für die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen". Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben A39 (S24/2/91) der Stiftung Stahlanwendungsforschung. Untersuchungsberichte Nr. 9123/6709 A bis D -Dn/bd- des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, 1993.
- [2/12] Dorn, T.; Hosser, D.; Muess, J.; Schaumann, P.: "Ein rechnerisches Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von kammerbetonierten Verbundträgern, Teil 1: Einfeldträger", Stahlbau 59, Heft 12, 1990.
- [2/13] Cajot, L.G.; Schleich, J.B.; Hass, R.: The Fire Design of Composite Beams According to the Eurocode 4, Part 10, Structural Fire Design. Posters of the Nordic Steel Colloquium in Odense/Denmark, 1991.

- [2/14] Schaumann, P.; Hass, R.; Falke, J.: Anwendungsbezogene Aufbereitung der neueren nationalen Forschungsergebnisse für Verbundbauteile unter Brandbeanspruchung im Spiegel internationaler Bemessungsvorschläge. Forschungsbericht, Düsseldorf, 1992.
- [2/15] Dorn, T.; Hosser, D.: Ein rechnerisches Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von kammerbetonierten Verbundträgern, Teil 2: Durchlaufträger. Stahlbau, Heft 8, S.233 ff, August 1994.
- [2/16] DIN 4102 Teil 4: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. Ausgabe März 1994.
- [2/17] Kiel, M.: Analyse brandbeanspruchter, ebener Rahmentragwerke: s. [1/16].
- [2/18] Dorn, T.: Zur Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Träger-Stützen-Anschlüsse. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, Heft 99. 1993.
- [2/19] ENV 1991-2-2-Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures; Teil 2-2: Actions on Structures Exposed to Fire. 1994.
- [2/20] prENV 1992-1-2-Eurocode 2: Design of Concrete Structures; Teil 1-2: Structural Fire Design. Draft October 1993.
- [2/21] Hosser, D.; Dorn, T.; EL-Nesr, O.: "Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen Teil 1", Stahlbau, Heft 3, S.71 ff. März 1994.
- [2/22] Hosser, D.; Dorn, T.; EL-Nesr, O.: "Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen Teil 2 und Schluß", Stahlbau, Heft 4, S.116 ff. April 1994.
- [2/23] prENV 1993-1-2-Eurocode 3: Design of Steel Structures; Teil 1-2: Structural Fire Design. October 1993.
- [2/24] ENV 1995-1-2-Eurocode 5: Design of Timber Structures; Teil 1-2: Structural Fire Design. October 1993.
- [2/25] Bemessungshilfen zu Eurocode 2 Teil 1 - Planung von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken. Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 425. Beuth Verlag, Berlin 1992.
- [2/26] Stützenbemessung für $f_{yd} = 500$ MPa anstelle von sonst 435 MPa. Persönliche Mitteilung von Prof. Dr.-Ing. U. Quast, Oktober 1993.
- [2/27] Hertz, K.: Simplified Calculation Method for Fire Exposed Concrete Structures. Supporting Document for prENV 1992-1-2. Institute of Building Design, Report No. 203. Technical University of Denmark. 1993.
- [2/28] Twilt, L.; Both, C.: Technical Notes on the Realistic Behaviour and Design of Fire Exposed Steel and Composite Steel-Concrete Structures. ECSC-project P 1905 7210, SA-112, Part D: Technical Notes. TNO-report BI-91-069, 1991.

- [2/29] Litzner, U.: Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2 - Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227. Beitrag im Betonkalender 1995 Teil 1. Verlag Ernst & Sohn, Berlin. 1995.
- [2/30] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Richtlinie zur Anwendung von Eurocode 2 - Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau. Fassung April 1993.

5.3 Literatur zum Kapitel 3

- [3/1] Hosser, D.; Schneider, U.: Sicherheitskonzept für brandschutztechnische Nachweise von Stahlbetonbauteilen nach der Wärmebilanztheorie. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Az.: IV/1-5-252/80 des Instituts für Bautechnik, Berlin, vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, 1980.
- [3/2] Henke, V.: Ein Beitrag zur Zuverlässigkeit frei gelagerter Stahlbetonstützen unter genormter Brandeinwirkung. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, Heft 45. 1980.
- [3/3] Hertz, K.: Simplified calculation method for fire exposed concrete structures. Supporting document for CEN prENV 1992-1-2. Technical University of Denmark, Lyngby. 1993.
- [3/4] Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Deutsche Fassung ENV 1992 1-1: 1991. Juni 1992.
- [3/5] prENV 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures part 1-2: Structural fire design. October 1993.
- [3/6] DIN V ENV 1993 Teil 1-1 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Deutsche Fassung ENV 1993-1-1: 1992. Vornorm April 1993. Hg.: Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.
- [3/7] prENV 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures part 1-2: Structural fire design. Mai 1993.
- [3/8] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, 1. Auflage. Berlin. Beuth Verlag GmbH, 1981.
- [3/9] Kersken - Bradley, M.: Schlußbericht zum Auftrag IV 1-5-664 /92. Mitarbeit im CEN TC 250 Konstruktiver Brandschutz. 19 .
- [3/10] Design of concrete structures for fire resistance. Preliminary Draft of an Appendix to the CEB - FIP Model Code. Bulletin d' Information N 145. Comité Euro - International du Béton. Paris 1982.
- [3/11] Schneider Bautabellen, 10. Auflage. Düsseldorf. Werner Verlag. 1992.

- [3/12] Hosser, D.; König, G.; Theile, V.: Stellungnahme zu den Sicherheitsfestlegungen in Eurocode No 2. Abschlußbericht im Auftrag des Instituts für Bautechnik (Az. IV-1-7/97.1). König und Heunisch, Beratende Ingenieure. Frankfurt/Main. August 1985.
- [3/13] Hosser, D.: Zuverlässigkeitstheorie und Sicherheitstechnik. Vorlesungsskriptum. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig. 1993.
- [3/14] Scherbanowitz, M.: Auslegung eines Geschoßbaus auf bauaufsichtliche Brandschutzanforderungen und vergleichende brandschutztechnische Bauteilbemessung nach Eurocode 3 und 4. Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig. April 1994.
- [3/15] Programm 'Comrel', RCP GmbH, 80799 München.
- [3/16] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Grundwissen für Ingenieure. Verlag der Fachvereine, Zürich und Verlag Teubner, Stuttgart. 1994.
- [3/17] Scherbanowitz, M.: Herleitung eines einheitlichen Sicherheitskonzeptes bei Anwendung der vereinfachten Rechenverfahren in den Brandschutzteilen der Eurocodes. Diplomarbeit. Technische Universität Braunschweig. Mai 1995.
- [3/18] DIN 4102 Teil 2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe September 1977.
- [3/19] DIN 4102 Teil 4: s. [2/16]
- [3/20] Stahlbau: Vorschriften, Normen und Profile. Herausgegeben vom Deutschen Stahlbau-Verband DSTV, Köln. Sonderausgabe aus dem Stahlbau-Taschenkalender 1987.
- [3/21] Hass, R.; Meyer-Ottens, C.; Richter, E.: Stahlbau Brandschutz Handbuch. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993.
- [3/22] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, 1. Auflage, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1981.
- [3/23] Winter, S.: Berechnungsbeispiel zum Eurocode 5 Teil 10. Institut des Zimmer- und Holzbaugewerbes e.V., Darmstadt. April 1994.
- [3/24] König, G.; Hosser, D.; Schobbe, W.: Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NABau - eine Erläuterung. Bauingenieur 57, Seite 69-78, 1982.
- [3/25] Peseke, L.: Brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen nach Eurocode 2 zum Vergleich des Sicherheitsniveaus bei unterschiedlichen Bauarten. Großer Entwurf. Technische Universität Braunschweig. März 1994.
- [3/26] Neumann, P.: Zur Bewertung des Sicherheitsniveaus der brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen nach Eurocode 3 und 4. Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig. März 1994.

- [3/27] Meyer, C.; Favre, P.: Vergleich der verschiedenen rechnerischen Methoden von Eurocode 5 Teil 1-2. Praktikumsbericht. Technische Universität Braunschweig. August 1994.
- [3/28] "Kosten- und flächensparendes Bauen als Beitrag zur Wohnungs- und Städtebaupolitik". Schriftenreihe 01 "Modellvorhaben, Versuchs- und Vergleichsbauweise" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau - Heft Nr. 01.073. 1987.

